

УДК 622.02

Коптяков Дмитрий Александрович
аспирант, младший научный сотрудник,
лаборатория геoinформационных
и цифровых технологий в недропользовании,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, д. 58,
e-mail: koptyakov_d@mail.ru

Харисов Тимур Фаритович
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория геомеханики подземных сооружений,
Институт горного дела УрО РАН;
доцент кафедры шахтного строительства,
Уральский государственный горный университет
620014, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
e-mail: Timur-ne@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕРПЕНТИНИТОВ ЖИТИКАРИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Аннотация:

В данном исследовании проведены определения физико-механических свойств горных пород, слагающих прибортовой массив Житикаринского карьера. Полученные значения механических характеристик проанализированы статистически. Методами исследований являлись лабораторные испытания на прочность при одноосном сжатии, растяжении, регрессионный анализ полученных данных. В ходе испытаний на прочность при одноосном сжатии фиксировались значения вертикальной нагрузки, вертикального напряжения, средней вертикальной деформации, продольной деформации, поперечной деформации. Были получены графики роста вертикального напряжения в образце горной породы, зависимости вертикальных напряжений от вертикальных деформаций образца. В ходе испытания на прочность при растяжении была зафиксирована максимальная разрушающая сила для образцов правильной формы (бразильский метод) и определены площади поверхности разрыва образцов. По результатам испытаний и статистической обработки данных получены значения прочности при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$, модуля деформации E_d , прочности при растяжении σ_r для десяти наименований горных пород, отобранных на участке прибортового массива Житикаринского карьера. Регрессионный анализ использовался для установления корреляционных зависимостей между значениями физических и механических характеристик. Прочностные характеристики закономерно снижаются с увеличением степени серпентинизации горных пород в зависимости от минерального типа серпентинизации.

Ключевые слова: серпентинизация, минеральный тип серпентинизации, прочность при одноосном сжатии, модуль деформации, прочность при растяжении, месторождение баженковского промышленного типа, месторождение, серпентинит, Житикаринский карьер

DOI: 10.25635/2313-1586.2020.02.127

Koptyakov Dmitry A.
Postgraduate Student, Junior Researcher,
Laboratory of Geoinformation
and Digital Technologies in Subsoil Use,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: koptyakov_d@mail.ru

Kharisov Timur F.
Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Laboratory of Geomechanics of Underground Structures,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS;
Associate Professor of the Department
of Mine Construction, Ural State Mining University
Ekaterinburg, 30 Kuibysheva Str.
e-mail: Timur-ne@mail.ru

RESEARCH OF REGULARITIES OF STRENGTH CHARACTERISTICS OF SERPENTINITES OF ZHITIKARINSKY DEPOSIT

Abstract:

When forming chrysotile-asbestos deposits, the key process is serpentinization of rocks. Serpentinization, the process of changing (hydration) of ultrabasic rocks under the influence of thermal water solutions, which is expressed in the replacement of anhydrous magnesium silicates with minerals of the serpentine group. Spatial variability of physical and mechanical properties of serpentine rocks is largely determined by their genesis, structure, and material composition. In this study, the physical and mechanical properties of rocks composing the instrument array of the Zhitikarinsky quarry have been determined. The obtained values of mechanical characteristics were statistically analyzed. The research methods were laboratory tests for strength under uniaxial compression, tension, and regression analysis of the obtained data. During strength tests for uniaxial compression, the values of vertical load, vertical stress, average vertical strain, longitudinal strain, and transverse strain were recorded. Graphs of the growth of vertical stress in the rock sample and the dependence of vertical stress on the vertical deformations of the sample were obtained. In the course of the tensile strength test, the maximum breaking force for correctly shaped samples was recorded (the Brazilian method) and the surface areas of the samples were determined. According to the results of tests and statistical data processing, the values of the uniaxial compression strength $\sigma_{сж}$, the modulus of deformation E_d , and the tensile strength σ_r were obtained for ten types of rocks collected in the adjacent rock mass of Zhitikarinsky quarry. Regression analysis was used to establish correlations between the values of physical and mechanical characteristics. Strength characteristics naturally decrease with increasing degree of serpentinization of rocks, depending on the mineral type of serpentinization.

Keywords: serpentinization, mineral type of serpentinization, strength under uniaxial compression, modulus of deformation, tensile strength, Bazhenov's industrial type deposit, field, serpentine, Zhitikarinsky quarry

Введение

Одним из характерных примеров процесса серпентинизации является Житикаринское месторождение. Оно расположено в массиве ультрамафитов Притобольско-Аккаргинского комплекса, относящегося к Баженовскому геолого-промышленному типу, где ввиду сложившихся горно-геологических условий возрастает роль изученности пространственной изменчивости свойств горных пород и точности определения параметров, характеризующих их устойчивость [1 – 5]. С этой целью проводятся инженерно-геологические исследования и научно-исследовательские работы, включающие лабораторные и полевые испытания горных пород по изучению закономерностей пространственной изменчивости структуры массива, состава горных пород и их физико-механических свойств [6 – 11].

Серпентинизация горных пород играет главенствующую роль в формировании Житикаринского месторождения и предопределяет изменение вещественного состава и свойств пород. Таким образом, детальное исследование и актуализация физико-механических свойств горных пород на участке прибортового массива Житикаринского карьера и их пространственная изменчивость в зависимости от серпентинизации являются целью данного исследования.

Объект исследований

На Житикаринском месторождении выделяется несколько промышленных залежей хризотил-асбеста. Залежь, содержащая 82 % запасов 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°. Всякий бок залежи составляют серпентиниты, серпентинизированные перидотиты. В лежащем боку залегают перидотиты. Контуры всяческого бока асбестоносных серпентинитов нечеткие, лежащий бок примыкает к перидотитовому ядру.

Распространение серпентинизации увеличивается от ультрамафитового ядра к периферии массива. Зона полностью серпентинизированных пород занимает до 70 % объема залежи. Она слагает восточную и частично осевую ее части. В структурном отношении залежь обусловлена двумя разломами, кроме того, имеются зоны дробления, которые можно выделить по признаку трещиноватости.

Геологическое строение месторождения определяет области для структурного преобразования массива и изменчивости физико-механических свойств горных пород в массиве. По результатам анализа условий месторождения объектом исследования был определен ряд горных пород: перидотит, серпентинит апоперидотитовый, серпентинизированный перидотит, серпентинит аподунитовый хризолит лизардитовый, серпентинит апоперидотит лизардитовый, серпентинит аподунитовый лизардитовый, серпентинит лизардитовый асбестоносность, серпентинит лизардитовый, серпентинит лизардитовый оталькованный, серпентинит апоперидотитовый хризолит лизардитовый [12].

Методы исследований

Отбор проб, который использовался для подготовки образцов, выполнен на участке прибортового массива в соответствии с ГОСТ 21153.0-75 «Породы горные. Отбор проб и общие требования к методам физических испытаний». Количество отбираемого материала определялось возможностью получения достаточного количества образцов правильной геометрической формы с необходимыми размерами. Для подготовки цилиндрических образцов использовались лабораторные колонковые сверла и камнерезные машины. С целью получения наиболее точных результатов испытаний обеспечено качество подготовки торцевых и перпендикулярных боковых поверхностей. На основании визуального обследования отобраны наиболее изотропные, однородные и наименее выветрелые подготовленные образцы 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 $\sigma_{сжi}$ для каждого i -го образца выборки имеет следующий вид:

$$\sigma_{сжi} = K_B \frac{P}{S} 10, \quad (1)$$

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 :

$$E_d = \frac{\sigma_K - \sigma_H}{\varepsilon_{1K} - \varepsilon_{1H}}, \quad (2)$$

где σ_K и σ_H – значения сжимающего напряжения в диапазонах частичной пригрузки и разгрузки образца, соответственно;

ε_{1K} и ε_{1H} – 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

$$\sigma_P = 10 \frac{P}{S}, \quad (3)$$

где P – разрушающая сила, кН;

S – площадь разрыва образца, см².

Статистическая обработка результатов, а именно расчет среднеарифметического значения для числа n образцов выборки и стандартное отклонение выполнялась по следующим формулам:

$$\sigma_{CP} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i; \quad (4)$$

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\sigma_i - \sigma_{CP})^2}. \quad (5)$$

Результаты исследований

Полученные результаты испытаний образцов исследуемых горных пород и данные их статистической обработки представлены в табл. 1, где прослеживается незначительное снижение удельного веса в зависимости от степени и минерального типа серпентинизации. Значения прочности при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$ перидотита, серпентинизированного перидотита варьируются 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. Так же, как и в случае со значениями прочности при одноосном сжатии, прочность при растяжении снижается в зависимости от степени и минерального типа серпентинизации.

Таблица 1

Результаты испытаний серпентинитовых пород Житикаринского месторождения

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 аподунитовый хризолит 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 аподунитовый 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 асбестоносность	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 хризолит 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

Для выражения связей между свойствами горных пород и попытки получения надежных эмпирических зависимостей применялся регрессионный анализ значений физико-механических свойств. К. Diamantis и соавторы в 2009 г. получили зависимости прочности при одноосном сжатии от физико-механических свойств и степени серпентинизации [14 – 15]. А. Теймен и 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 исследования данных зависимостей установлена корреляционная связь между прочностью при одноосном сжатии и удельным весом исследуемых пород, которая представлена на рис. 1а:

$$\sigma_{сж} = 39,339\gamma - 966,01 \quad (R^2 = 0,87). \quad (6)$$

Соотношение предела прочности при растяжении и удельного веса пород отображено на рис. 1б, оно описывается линейной зависимостью, но с более низким коэффициентом детерминации R^2 :

$$\sigma_p = 1,3602\gamma - 31,87 \quad (R^2 = 0,68). \quad (7)$$

На рис. 1в представлено соотношение двух прочностных характеристик, предел прочности при одноосном сжатии и растяжении исследуемых пород:

$$\sigma_{сж} = 19,948\sigma_p - 12,406 \quad (R^2 = 0,61). \quad (8)$$

Кроме того, установлена зависимость между пределом прочности при одноосном сжатии и модулем деформации, которая изображена на рис. 1г:

$$\sigma_{сж} = 0,0031E_d - 2,2904 \quad (R^2 = 0,96). \quad (9)$$

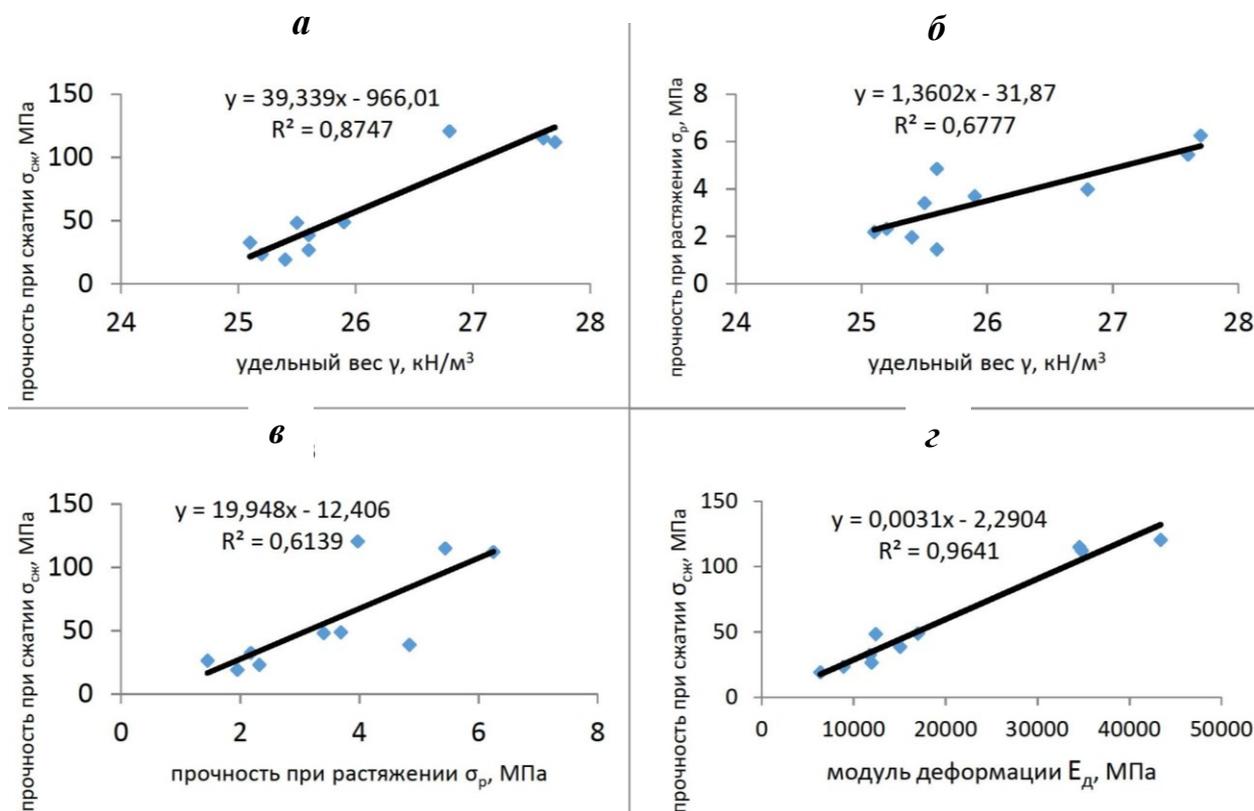


Рис. 1 – Зависимости между удельным весом и механическими свойствами

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

$$\sigma_{сж} = -298,385 + 11,957\gamma + 0,002E_d. \quad (10)$$

Проверка путем соотношения расчетных значений прочности при одноосном сжатии и значений, полученных в результате лабораторных испытаний, представлена на рис. 2.

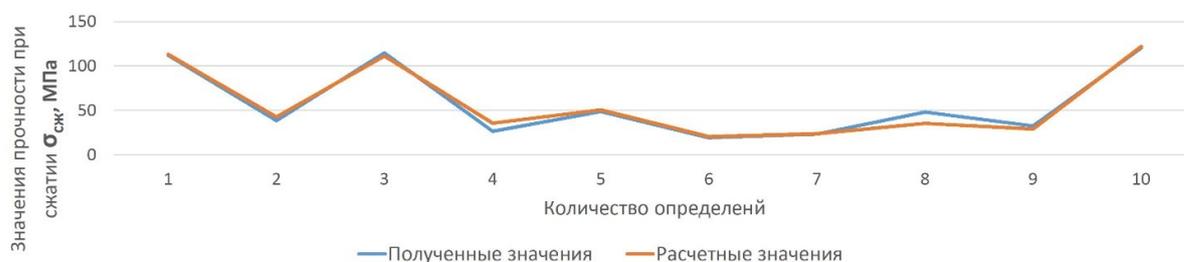


Рис. 2 – Соотношение значений прочности при одноосном сжатии, расчетных и определенных по результатам лабораторных испытаний

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 апоперидотитовые хризотил лизардитовые. Наименее прочными из исследованных горных пород являются серпентины 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 аподунитовый хризотил лизардитовый имеет наименьшую прочность при растяжении, среди исследуемых серпентинитов. Серпентинит аподунитовый лизардитовый показывает наименьшую прочность при одноосном сжатии. Установлены корреляционные зависимости физико-механических свойств серпентинитовых пород Житикаринского месторождения.

Литература

1. Брянчанинова Н. И. Серпентиниты полярного Урала, какие они есть / Н.И. Брянчанинова, А. Б. Макеев // Вестник Института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. - 2004. - № 2 (110). - С. 15-19.
2. Попов Ю. В. Минеральный состав серпентинитов тектонического меланжа даховского кристаллического выступа (Большой Кавказ) / Ю. В. Попов, А. В. Жабин, О. Е. Пустовит // Геология и геофизика Юга России. - 2019. - Т. 9, № 4. - С. 38-48.
3. Геологическое строение и минералогия мечниковского месторождения золота, Южный Урал / И. Ю. Мелекесцева, В. В. Зайков, Г. А. Третьяков, К. А. Филиппова, В. А. Котляров // Литосфера. - 2019. - Т. 19, № 1. - С. 111-138.
4. Serpentine from Moeche (Galicia, North Western Spain). A stone used for centuries in the construction of the architectural heritage of the region / J. Nespereira, R. Navarro,

S. Monterrubio, M. Yenes, D. Pereira // Sustainability (Switzerland). - 2019. - Vol. 11(9). - № 2700.

5. Magma-serpentinite interaction as the origin of diatremes: a case study from the Hyblean Plateau (southeastern Sicily) / F.C. Manuella, S. Carbone, C. Ferlito, M. Hovland // International Journal of Earth Sciences. - 2016. - 105(5). - С. 1371-1385

6. Джафаров Н. Н. Полезные ископаемые Джетыгаринского рудного района (Костанайское Зауралье) / Н. Н. Джафаров, Ф. Н. Джафаров. – Алматы : Алеем, 2002. – 244 с.

7. Панжин А. А. Комплексное геомеханическое обоснование углов заоткоски бортов карьера / А. А. Панжин, Т. Ф. Харисов, О. Д. Харисова // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2019. - № 3. – С. 295-306.

8. Жаворонкин В. И. Физические свойства и петрологические особенности серпентинитов Даховского массива (Западный Кавказ) / В. И. Жаворонкин, В. М. Ненахов, В. Н. Короб // Физико-химические и петрофизические исследования в науках о земле : материалы XX международной конференции / ГЕОХИ РАНБ. – Москва, 2019. - С. 104-107.

9. Ulamiş K. Shear strength of extremely altered serpentinites based on degree of saturation (Ankara, Turkey) / K. Ulamiş // Journal of Mountain Science. - 2019. - №16(4). - С. 944-954.

10. Preliminary laboratory characterization of serpentinite rocks from Calabria (southern Italy) employed as stone material / R. Punturo, R. Cirrincione, G. Pappalardo, E. Fazio, A. Bloise // Journal of Mediterranean Earth Sciences. - 2018. - № 10. - С. 79-87.

11. Deformation processes, textural evolution and weakening in retrograde serpentinites / C. Viti, C. Collettini, T. Tesei, M. S. Tarling, S. A. F. Smith // Minerals. - 2018. - № 8(6). - С. 241.

12. Калачев В. А. Об особенностях роста трещин в вязко-упругой среде с развитой иерархической структурой / В. А. Калачев, П. Е. Панфилов, Д. В. Зайцев // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. - 2017. - № 3 (41). - С. 59-64.

13. Харисов Т. Ф. О проблемах экспресс-метода определения прочности горных пород / Т. Ф. Харисов, А. А. Панжин, О. Д. Харисова // Известия вузов. Горный журнал. – 2019. - № 7. – С. 86-91.

14. Diamantis K. Study on uniaxial compressive strength, point load strength index, dynamic and physical properties of serpentinites from Central Greece: Test results and empirical relations / K. Diamantis, E. Gartzos, G. Migiros // Engineering Geology. – 2009. - № 3-4. – С. 199-207.

15. Diamantis K. Estimating the Rock Mass Properties of Ultramafic Rocks in Central Greece Using the Triaxial Tests of Intact Rock and the Geological Strength Index / K. Diamantis, G. Migiros // Geotechnical and Geological Engineering. - 2019. - № 37(3). - С. 1839-1858

16. Теймен А. Прогнозирование основных механических параметров туфов по результатам испытаний / А. Теймен // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2018. - № 5. – С. 18-32.

17. Алексеев А. Ф. Физико-механические свойства метасоматитов серпентинитовой формации Баженовского месторождения хризотил-асбеста / А.Ф. Алексеев, О.Н. Грязнов // Инженерная геология. - 2013. - № 4. - С. 54-59.

18. Особенности деформационного поведения малогабаритных образцов горных пород / В. А. Калачев, Г. П. Панфилов, А. Н. Кочанов, Ю. А. Костандов, Д. В. Зайцев, П. Е. Панфилов // Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций: сборник материалов XII международной конференции, (Екатеринбург, 21-25 мая 2018 г.). – Екатеринбург : ИМАШ УрО РАН. - 2018. - С. 281-282.