

ВЛИЯНИЕ НАРУШЕННОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД НА ИХ СВОЙСТВА И СОСТОЯНИЕ

О. Г. Латышев, О. О. Казак

The influence of the geological material disturbance on its properties and condition

O. G. Latyshev, O. O. Kazak

The properties of the geological material and rock masses are to a degree defined by their fracture structure, or the disturbance degree. The natural massifs possess the property of hierarchy (M.A. Sadovsky), which consists in the structure's similarity on different levels of the hierarchy. In accordance with all that, this article deals with the problem of the regularity of the formation of the strength properties as well as deformative characteristics on the level of minute cracks, rock samples and block massifs. The minute cracks survey with the help of the luminescent method of crack detection is the basis of the theoretical treatment of the issues of destructibility of the rock from the energetic viewpoint. In the scale of mineral granules sizes, strength properties as well as deformative characteristics of the rocks are exponentially connected with the samples' damages on a microlevel. The quantity of the common porosity may serve as a measure of a fracture degree on a representative samples' level. The statistical dependencies of a given quantity with the basic mechanical characteristics of the rocks have been defined. The properties of the rock mass are defined by its sectional structure and geometrical characteristics of the partings in the scales, which are comparable to the mine working sizes. The sizes of rock blocks are estimated by the Weibull distribution. Considering the intrinsic fractures from the fractal positions allows to define the contact rigidity of their edges and to predict the modulus of the massif deformation. The strength passport of the rock mass is defined with the structural attenuation factor, which is adequately evaluated by the variation of the strength of the adjoining rocks and also by the modulus of fracture array. The regularities defined create the basis for projecting the technology of the processes of rock destruction. The forecast of the strength property and deformation characteristics of the rock mass are the basis of the calculation of stability of underground workings with the finite-element method.

Keywords: rocks and massifs; fracture structure; levels of hierarchy; strength; deformability.

Свойства горных пород и породных массивов в значительной мере определяются их трещинной структурой (степенью нарушенности). Природные массивы обладают свойством иерархичности (М. А. Садовский), заключающемся в подобии структуры на разных уровнях иерархии. В соответствии с этим в статье рассмотрены закономерности формирования прочностных и деформационных характеристик на уровне микротрещин, породных образцов и блочных массивов. Исследования микротрещин люминесцентным методом дефектоскопии являются базой теоретического рассмотрения вопросов разрушаемости горных пород с энергетических позиций. В масштабе размеров минеральных зерен прочностные и деформационные характеристики пород экспоненциально связаны с концентрацией нарушений образцов на микроуровне. На уровне представительных проб (образцов) мерой нарушенности может служить величина общей пористости. Установлены статистические зависимости данной величины с основными механическими характеристиками пород. В масштабах, сопоставимых с размерами горных выработок, свойства породного массива определяются его блочным строением и геометрическими характеристиками трещин отдельности. Размеры породных блоков оцениваются распределением Вейбулла. Рассмотрение природных трещин с фрактальных позиций позволяет определить жесткость контактов их берегов и прогнозировать модуль деформации массива. Паспорт прочности породного массива определяется коэффициентом структурного ослабления, адекватно оцениваемым вариацией прочности вмещающих пород и модулем трещиноватости массива. Установленные закономерности создают базу для проектирования технологии процессов разрушения горных пород. Прогноз прочностных и деформационных характеристик породного массива является основой расчета устойчивости подземных выработок методом конечных элементов.

Ключевые слова: горные породы и массивы; трещинная структура; уровни иерархии; прочность; деформируемость.

Теория и практика свидетельствуют о том, что свойства и состояние горных пород в первую очередь определяются степенью их нарушенности. Применительно к задачам горного производства основным показателем нарушенности является трещиноватость пород. В соответствии с теорией академика М. А. Садовского [1, 2] горные породы и их массивы представляют собой самоподобную иерархическую структуру, образованную трещинами. Свойства и состояние пород на любом уровне иерархии i определяется величиной критерия [3]: $K = R_i/L_i$, где R_i – среднее расстояние между трещинами; L_i – средний размер трещины. Тогда для прогноза характеристик горных пород и их массивов следует определить их свойства на различных уровнях иерархии. В данной работе исследуются три уровня: микротрещины, нарушенность на уровне образца и трещинная структура массива.

Для изучения нарушенности пород на микроуровне на кафедре шахтного строительства УГГУ разработан метод люминесцентной дефектоскопии [4, 5]. На рис. 1 представлены элек-

тронные фотографии образца (туф) на разных стадиях нагружения горной породы.

В ходе эксперимента определялись характеристики трещиноватости горных пород и комплекс их свойств. Установлено, что прочностные и деформационные характеристики пород экспоненциально зависят от концентрации трещин N . В частности, прочность при сжатии определяется уравнением:

$$\sigma_{\text{сж}} = \sigma_0 \exp(-d^3 N);$$

– модуль упругости:

$$E_{\text{сж}} = E_0 \exp(-2d^3 N).$$

Здесь индекс «0» обозначает свойства ненарушенной горной породы; d – средний размер минеральных зерен.

По мере нагружения горных пород наблюдаются рост трещин, их ветвление и слияние с образованием кластеров (рис. 1). На этом уровне выделить отдельные трещины с оценкой их концентрации не представляется возможным. Установлено, что в целом трещинная структура горных пород обладает фрактальными свойствами [5]. Мерой нарушенности пород может служить их кластерная размерность. Для ее определения на электронное изображение поверхности образца накладывается сетка с изменяющимся размером квадратной ячейки δ_i . Для каждого типоразмера сетки определяется количество ячеек N_p , занятых изображением объекта (кластером). Фрактальная кластерная размерность определяется соотношением: $d_k = \ln N_i / \ln(1/\delta_i) + 1$. Анализ экспериментальных данных показывает, что кластерная размерность закономерно возрастает с увеличением напряжений σ в горной породе. Эта зависимость статистически надежно описывается уравнением параболы:

$$d_k = d_{k0} + k(\sigma^2 - b\sigma),$$

где d_{k0} – начальная кластерная размерность ненагруженного образца; k, b – эмпирические коэффициенты, зависящие от типа горной породы. Для указанного на рис. 1 образца: $d_{k0} = 2,48$; $k = 8 \cdot 10^{-5}$; $b = 8,75$.

На следующем уровне иерархии (в объеме инженерно-геологической пробы) сводной характеристики нарушенности горных пород может служить ее коэффициент пористости P . Ее величина определялась пикнометрическим методом как отношение объема пор к объему минерального скелета. В результате

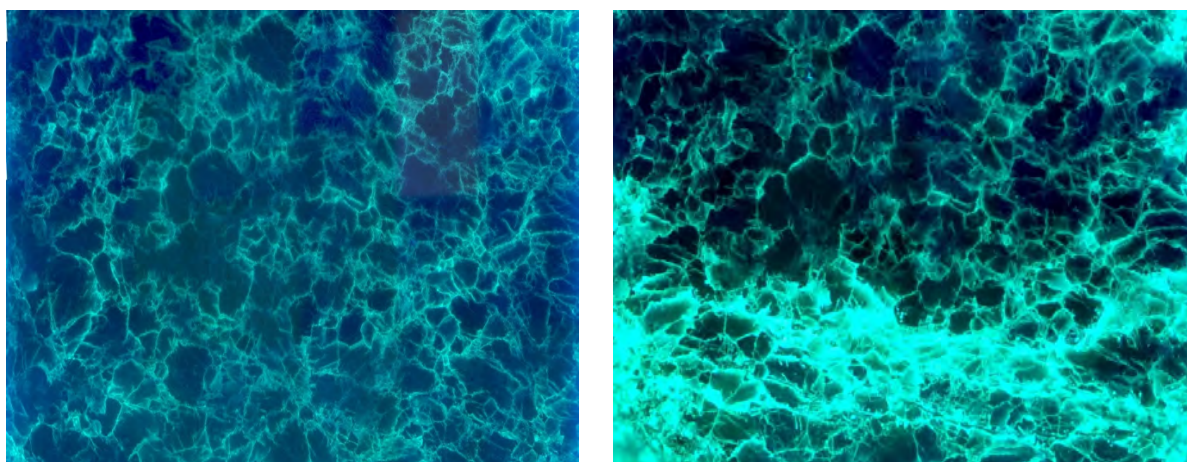


Рисунок 1. Электронные фотографии трещинной структуры горной породы на разных стадиях нагружения.

Зависимость свойств горных пород от их пористости.

Уравнения связи	Параметры уравнений связи	
	Эффузивные породы	Бокситы
$\rho = (\rho_1 \pm P^k) (1 - P)$	$\rho_1 = 3,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ $k = 0,43$ $\eta = 0,72 \pm 0,05$	$\rho_1 = 3,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ $k = 0,60$ $\eta = 0,93 \pm 0,03$
$E = E_0 (1 - aP)^2$	$E = 51 \text{ ГПа}; a = 3,3;$ $\eta = 0,58 \pm 0,07$	$E = 91 \text{ ГПа}; a = 2,6;$ $\eta = 0,71 \pm 0,12$
$X = X_0 (1 - a_1 P)$	$\sigma_{р(0)} = 18,4 \text{ МПа}; a_1 = 7,0;$ $r = -0,49 \pm 0,08$	$\sigma_{р(0)} = 19,7 \text{ МПа};$ $b = 0,90;$ $\eta = -0,96 \pm 0,02$
$X = X_0 b^{100P}$	$\sigma_{ск(0)} = 126 \text{ МПа}; a_1 = 7,0;$ $r = -0,47 \pm 0,08$ $P_{к(0)} = 2,3 \text{ ГПа}; a_1 = 7,0;$ $r = -0,65 \pm 0,09$	$\sigma_{ск(0)} = 171 \text{ ГПа};$ $b = 0,92;$ $\eta = -0,93 \pm 0,03$ $P_{к(0)} = 2,5 \text{ ГПа}; b = 0,93;$ $\eta = -0,91 \pm 0,03$

Здесь ρ – объемная масса; E – модуль упругости; X – прочность горных пород при растяжении σ_r , сжатии $\sigma_{ск}$ и контактная прочность P_k (r, η – коэффициент корреляции и корреляционное отношение).

комплексных исследований скальных пород Урала [6] установлена система статистических уравнений связи свойств пород с величиной их пористости. В таблице дана сводка структуры и параметров этих уравнений для эффузивных пород и бокситов Североуральских месторождений.

Полученная система уравнений позволяет прогнозировать свойства пород с разной степенью нарушенности (пористости). Однако само определение пористости – достаточно трудоемкая операция, связанная с отбором и доставкой проб в специально оснащенный лабораторию. Для оперативного прогноза можно использовать зависимость пористости от скорости упругой волны C , которую можно достаточно просто измерить в производственных условиях: $P(\%) = 14/C$, где скорость волны измеряется в км/с.

Следующий уровень иерархии – породный массив. Здесь система пересекающихся трещин формирует, как правило, его блочное строение. Поэтому первой задачей является определение размеров блоков или модуля трещиноватости массива. Образование системы трещин определяется множеством случайных независимых факторов, поэтому их следует оценивать с вероятностных позиций. Исследование данного вопроса показывает, что распределение трещин в массиве (размеров блоков) надежно описывается распределением Вейбулла:

$$F(L_i) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{bL_i}{a} \right)^m \right],$$

где L_i – размер рассматриваемого блока; a – среднее расстояние

между трещинами отдельности (средний размер блока массива); b – параметр распределения (масштабный коэффициент); m – параметр распределения, характеризующий однородность массива.

В качестве примера рассмотрим толщу базальтов месторождения Юбилейное (Башкортостан), залегающих на глубине 250–500 м. По данным скважинных исследований¹, блочное строение массива определяется системами трещин с углом падения 20–45° и 70–80° к оси керна. Средний угол $\Theta = 30^\circ$. По результатам вероятностной оценки блочного строения параметры распределения Вейбулла для данных условий: $b = 0,891$; $m = 2,31$. Тогда вероятный размер породного блока составляет $L_i = 0,14$ м.

Следующей задачей является прогноз свойств трещиноватого (блочного) массива. Наиболее значимыми с точки зрения горной технологии являются деформационные и прочностные характеристики массива. В соответствии с исследованиями К. В. Рупнейта [7] модуль деформации блочного массива определится соотношением:

$$E = \frac{E_0}{1 + \sum_{i=1}^n \eta_i (1 - \sin^4 \Theta_i) \frac{L_i}{X_m} \cos \Theta},$$

где E_0 – модуль упругости вмещающих пород; Θ_i – угол наклона системы трещин, определяющий средний размер блока L_i ; X_m – линейный размер рассматриваемой области массива (как правило, определяется размером выработки); η_i – сводная характеристика трещиноватости пород, $\eta_i = \delta/\xi L_i$, δ – средняя ширина трещин; ξ – относительная площадь контактов берегов трещин.

Указанные параметры определяются на стадии инженерно-геологических исследований. Неоднозначной характеристикой здесь является величина относительной площади контактов трещин ξ . Отмечая это, К. В. Рупнейта предлагает в расчетах использовать некоторую среднюю величину $\xi = 4 \cdot 10^{-4}$. Однако совершенно очевидно, что эта величина будет существенно различной для разных по геометрии трещин. Кроме того, площадь контактов будет непрерывно меняться по мере деформации массива. Теоретические и экспериментальные исследования данного вопроса [8, 9] показали следующее.

При сближении берегов трещин деформируемых пород происходит смятие неровностей поверхностей соприкосновения и, как следствие, выполаживание их траекторий. Степень неровностей (изломанности) трещин однозначно оценивается их фрактальной размерностью d_f . Ее определение основано на законе Ричардсона [10], который устанавливает связь размера фрактального объекта $L(\delta_i)$ с шагом его измерения δ_i ; $L(\delta_i) = \alpha \delta_i^\beta$, где $\beta = 1 - d_f$. Существо закона Ричардсона состоит в том,

¹ Гуман О. М. Инженерно-геологическая и гидрогеологическая характеристика пород Юбилейного месторождения: отчет ООО «НПЦ Уралгеолпроект»: УГГУ, 2008. 411 с.

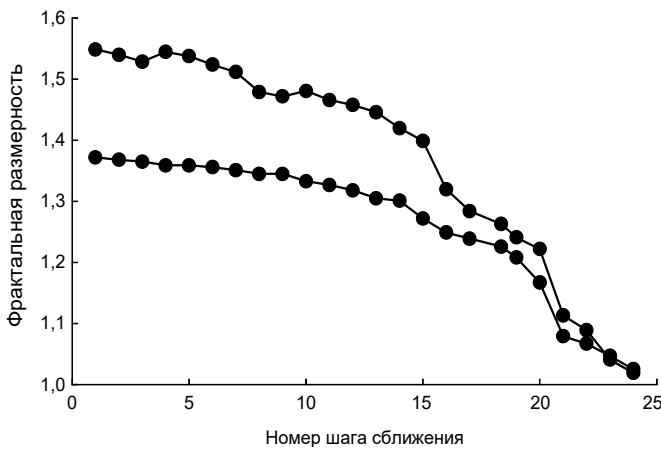


Рисунок 2. Изменение фрактальной размерности противоположных берегов трещины при их сближении и деформировании.

что чем меньше масштаб измерения (раствор циркуля), тем все больше подробностей измеряемого объекта (трещины) входит в результат и тем больше его размер. Это в полной мере относится к траектории трещин как бесконечно изломанной, нигде не дифференцируемой кривой. Величина фрактальной размерности определяется углом наклона графика уравнения Ричардсона в логарифмических координатах: $\ln[L(\delta_i)] = \delta_i \ln(1 - d_f) + \ln a$. Тогда процесс деформации трещин будет сопровождаться снижением фрактальной размерности ее берегов [9, 11]. На рис. 2 в качестве примера приведены результаты статистического моделирования деформации трещины массива Екатеринбургского метрополитена. Видно, что по мере деформации берегов разница в их фрактальной размерности уменьшается и в пределе (при полном смыкании) становится равной.

Результаты компьютерного моделирования трещин отрыва, сдвига и их комбинации позволили установить зависимость относительного контакта берегов трещин от фрактальной размерности их траектории:

$$\zeta_i = k d_{f0} (1 - b d_{fi}), \quad (1)$$

где d_{f0} – фрактальная размерность средней линии исходной трещины; k, b – эмпирические коэффициенты, зависящие от геометрии трещины и соотношения нормальных и сдвигающих деформаций.

В частности, для указанной на рис. 2 трещины: $d_{f0} = 1,468, k = 7,9 \cdot 10^{-3}, b = 0,68$. Для любой произвольной трещины, учитывая линейность зависимости (1), для оценки параметров уравнения достаточно получить две точки (провести два измерения). Приведенный ранее анализ для блочного строения месторождения Юбилейное показал, что для толщи базальтов на глубине 250–500 м модуль деформации $E = 0,9$ ГПа.

Для проектирования технологии горных работ и прогноза устойчивости выработок определяющее значение имеет прочность трещиноватого породного массива. Комплексной характеристикой разрушаемости пород является паспорт прочности. Применительно к трещиноватым массивам установлено [11], что наиболее адекватной оценкой служит уравнение паспорта прочности, основанное на теории дифференциальной прочности Г. Г. Литвинского [12]:

$$\tau = (1 - \omega) \tau_0 \left[\frac{\sigma}{\sigma_0} + 1 \right]^{(1-\omega)} \left(\frac{\sigma}{(1-\omega)\sigma_0} + 1 \right)^\omega.$$

Здесь параметры уравнения имеют следующий смысл: $\tau_0 = \sigma_0 f$ – сцепление, которое интерпретируется автором как произведение когезии разрыва σ_0 (т. е. удельной силы взаимодействия атомов горной породы) на коэффициент трения f . Для подавляющего большинства скальных пород когезия σ_0 и предел прочности на одноосное растяжение σ_p совпадают ($\sigma_0 = \sigma_p$). Показатель степени ω – характеристика нарушенности (поврежденности)

массива. Однако трактовка автором показателя поврежденности ω как «отношение площади трещин на некоторой поверхности к общей ее площади» неубедительна. В такой постановке для реального напряженного массива, где трещины, как правило, сожмнуты, при любом ω , заметно отличающемся от нуля, массив как сплошное связанное тело существовать не может. В то же время несомненно, что показатель связан со степенью трещиноватости массива (концентрацией трещин или модулем трещиноватости). В общем случае показатель ω следует рассматривать как коэффициент структурного ослабления массива $k_{стр}$, учитывающего масштабный эффект и модуль трещиноватости массива $J_{тр}$.

В исследованиях А. Н. Шащенко [13, 14] породный массив рассматривается как природная среда, нарушенная микродефектами различной природы и макродефектами в виде системы трещин, плоскостей ослабления и т. п. Для совместной оценки влияния данных факторов на прочность массива им предлагается следующая модель. Породный массив рассматривается как система плотно прилегающих друг к другу микроблоков, имеющих размеры и форму образцов, которые используются в стандартных испытаниях прочности. Те микроблоки, через которые проходит природная трещина массива, заведомо в лабораторных испытаниях не представлены и имеют нулевую прочность. Однако они содержатся в массиве и, следовательно, формируют генеральную совокупность. Тогда при организации классической выборки в статистике испытаний появятся нулевые величины. Это изменит величину дисперсии (коэффициент вариации) результатов, что и отразит влияние природной трещиноватости массива на его прочность. Вероятностный анализ данной модели позволил получить выражение коэффициента структурного ослабления массива [11]:

$$k_{стр} = \frac{a + b(1 - V_\sigma)}{c(0,2J_\tau + 1)},$$

где a, b, c – эмпирические коэффициенты; V_σ – коэффициент вариации единичных значений прочности в лабораторных испытаниях пород.

Анализ закономерностей распределения прочностных свойств горных пород для условий месторождения Юбилейное позволил получить значения данных коэффициентов: $a = 0,7; b = 0,8; c = 1,25$. В частности, на рис. 3 представлены паспорта прочности базальтов в образце и их толще в массиве.

Таким образом, представленные результаты исследований позволяют оценить прочностные и деформационные характеристики горных пород на разных уровнях трещинной структуры породных массивов. На уровне микротрещин полученные результаты создают базу для теоретического анализа прочности с позиций теории хрупкого разрушения и кинетической концепции. Применительно к трещиноватым породным массивам они

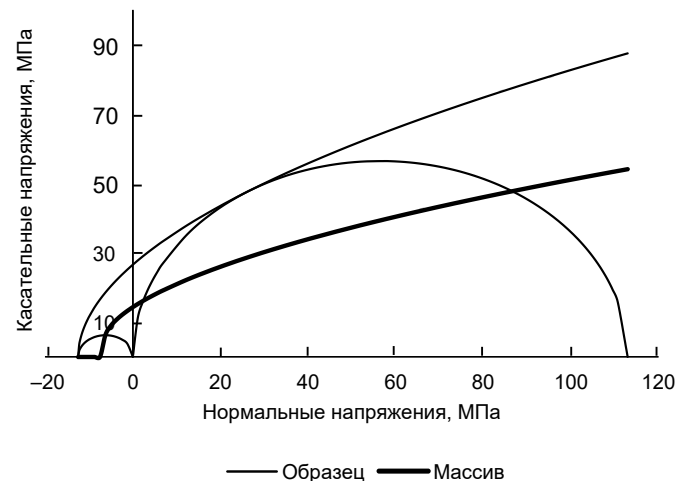


Рисунок 3. Сопоставление паспортов прочности базальта в образце и массиве.

являются основой прогноза прочности и устойчивости горных пород в выработке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Садовский М. А., Голубева Т. В., Писаренко В. Ф., Шнирман М. Г. Характерные размеры горной породы и иерархические свойства сейсмичности // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1984. № 2. С. 3–15.
2. Садовский М. А. Избранные труды: Геофизика и физика взрыва. М.: Наука, 2004. 440 с.
3. Журков С. Н., Куksenko В. С., Петров В. А., Савельев В. Н., Султанов У. О. О прогнозировании разрушения горных пород // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1977. № 6. С. 11–18.
4. Латышев О. Г., Корнилков М. В. Направленное изменение фрактальных характеристик, свойств и состояния пород поверхностно-активными веществами в процессах горного производства. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2016. 407 с.
5. Латышев О. Г., Корнилков М. В. Исследование трещинной структуры горных пород как фрактального объекта. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. 156 с.
6. Латышев О. Г. Разрушение горных пород. М.: Теплотехник, 2007. 672 с.
7. Руппенейт К. В. Деформируемость массивов трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1975. 223 с.
8. Латышев О. Г., Прищепа Д. В. Прогноз деформационных характеристик трещиноватого породного массива // Изв. вузов. Горный журнал. 2017. № 1. С. 80–86.
9. Латышев О. Г., Прищепа Д. В., Франц В. В. Статистическое моделирование природных трещин // Изв. вузов. Горный журнал. 2016. № 5. С. 38–45.
10. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы: пер. с нем. М.: Изд-во ИКИ, 2002. 656 с.
11. Латышев О. Г. Неоднородность трещинной структуры и прочность горных пород // Изв. вузов. Горный журнал. 2014. № 6. С. 152–159.
12. Литвинский Г. Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов. Донецк: Норд-Пресс, 2008. 207 с.
13. Шашенко А. Н., Тулуб С. Б., Сдвижкова Е. А. Некоторые задачи статистической геомеханики. Киев: Пульсари, 2002. 304 с.
14. Шашенко А. Н., Пустовойтенко В. П. Механика горных пород. Киев: Новый друк, 2003. 400 с.

REFERENCES

1. Sadovskiy M. A., Golubeva T. V., Pisarenko V. F., Shnirman M. G. 1984,

Kharakternye razmery gornoy porody i ierarkhicheskiye svoystva seismichnosti [Characteristic dimensions of rock and hierarchical properties of seismicity]. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Fizika Zemli* [USSR Academy of Sciences Bulletin. Physics of the Earth], no. 2, pp. 3–15.

2. Sadovskiy M. A. 2004, *Izbrannye trudy: geofizika i fizika vzryva* [Selected works: geophysics and physics of explosion]. Moscow, 440 p.
3. Zhurkov S. N., Kuksenko V. S., Petrov V. A., Savel'yev V. N., Sultanov U. O. 1977, *O prognozirovanii razrusheniya gornykh porod* [On the prediction of rock destruction]. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Fizika Zemli* [USSR Academy of Sciences Bulletin. Physics of the Earth], no. 6, pp. 11–18.
4. Latyshev O. G., Kornilkov M. V. 2016, *Napravlennoye izmeneniye fraktal'nykh kharakteristik, svoystv i sostoyaniya porod poverkhnostno-aktivnymi veshchestvami v protsessakh gornogo proizvodstva* [Directional change of the fractal characteristics, properties and state of rocks by means of the surfactants in the process of mining]. Ekaterinburg, 407 p.
5. Latyshev O. G., Kornilkov M. V. 2015, *Issledovaniye treshchinnoy struktury gornykh porod kak fraktal'nogo ob'ekta* [The study of the fracture structure of the rocks as a fractal object]. Saarbrücken, 156 p.
6. Latyshev O. G. 2007, *Razrusheniye gornykh porod* [Destruction of rocks]. Moscow, 672 p.
7. Ruppeneit K. V. 1975, *Deformiruemost' massivov treshchinovatykh gornykh porod* [Deformability of fractured rocks]. Moscow, 223 p.
8. Latyshev O. G., Prishchepa D. V. 2017, *Prognoz deformatsionnykh kharakteristik treshchinovatogo porodnogo massiva* [Prediction of the deformation characteristics of the fractured rock massif]. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], no. 1, pp. 80–86.
9. Latyshev O. G., Prishchepa D. V., Franz V. V. 2016, *Statisticheskoye modelirovaniye prirodnykh treshchin* [Statistical modeling of natural cracks]. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal]. # 5. Pp. 38-45.
10. Mandelbrot B. 2002, *Fraktal'naya geometriya prirody* [The Fractal Geometry of Nature]: tr. From German Moscow, 656 p.
11. Latyshev O. G. 2014, *Neodnorodnost' treshchinnoy struktury i prochnost' gornykh porod* [The heterogeneity of fracture structure and strength of rocks]. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], no. 6, pp. 152–159.
12. Litvinsky G. G. 2008, *Analiticheskaya teoriya prochnosti gornykh porod i massivov* [The analytical theory of the strength of rocks and massifs]. Donetsk, 207 p.
13. Shashenko A. N., Tulub S. B., Zdzvikhkova E. A. 2002, *Nekotorye zadachi statisticheskoy geomekhaniki* [Some issues of statistical geomechanics]. Kiev, 304 p.
14. Shashenko A. N., Pustovoytenko V. P. 2003, *Mekhanika gornykh porod* [Mechanics of rocks]. Kiev, 400 p.

Олег Георгиевич Латышев,

gtf.shs@ursmu.ru

Ольга Олеговна Казак,

Уральский государственный горный университет
Россия, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

Oleg Georgievich Latyshev,

gtf.shs@ursmu.ru

Ol'ga Olegovna Kazak,

Ural State Mining University
Ekaterinburg, Russia