

УДК 622.235.674.3

Соколов Василий Владимирович

кандидат технических наук,
сектор устойчивости бортов карьеров,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: direct@igduran.ru, lubk_igd@mail.ru

Шимкив Екатерина Сергеевна

научный сотрудник,
сектор устойчивости бортов карьеров,
Институт горного дела УрО РАН

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОВЕРХНОСТИ, СФОРМИРОВАННОЙ КОНТУРНЫМ ВЗРЫВАНИЕМ*

Аннотация:

В статье рассматриваются способы оценки качества контурного взрывания. Предлагается оценивать степень «гладкости» поверхностей, сформированных взрывными работами, с помощью фрактальной размерности и использовать данный показатель как критерий оценки контурного взрывания. В качестве объектов исследования использованы оцифрованные модели, полученные путем компьютерной обработки фотографий стенок горных выработок и откосов уступов. Приведена методика определения фрактальной размерности поверхности стенок горных выработок и откоса уступа карьера. Показано, что использование фрактальной размерности позволяет количественно оценить степень неровности поверхности горной выработки или откоса уступа карьера после производства контурного взрывания.

Ключевые слова: горные породы, горные выработки, контурное взрывание, поверхность откоса уступа, фрактальная размерность, массив, горные работы.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.04.066

Sokolov Vasily V.

Candidate of Technical Sciences,
Sector of stability of sides of quarries,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
58 Mamina-Sibiryaka Str.,
620075 Ekaterinburg
e-mail: direct@igduran.ru, lubk_igd@mail.ru

Shimkiv Ekaterina S.

Researcher,
Sector of stability of quarry boards,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS

USING FRACTAL DIMENSIONS TO EVALUATE THE SURFACE FORMED BY CONTOUR BLASTING

Abstract:

The article discusses ways to evaluate the quality of contour blasting. It is proposed to evaluate the degree of "smoothness" of the surfaces formed by blasting using fractal dimension and use this indicator as a criterion for evaluating contour blasting. Digitized models obtained by computer processing of photographs of the walls of mine workings and slopes of ledges were used as objects of research. A method for determining the fractal dimension of the surface of the walls of mine workings and the slope of the quarry ledge is presented. It is shown that the use of fractal dimension makes it possible to quantify the degree of unevenness of the mining surface or the slope of the quarry ledge after contour blasting.

Key words: rocks, mining operations, contour blasting, scarp slope surface, fractal dimension, massif, mining operations.

Введение

Массив, в котором ведутся горные работы, представляет собой измененную геологическую среду по сравнению с ее начальным состоянием. На устойчивость горных пород как в подземных, так и в открытых условиях влияет множество различных факторов (физико-механические свойства, трещиноватость, действующие напряжения, форма горной выработки или наклон откоса уступа, обводненность и т.д.).

В то же время ведение горных работ неотъемлемо связано с двумя ключевыми факторами – экономической целесообразностью и безопасностью ведения горных работ, поэтому этим вопросам уделяется большое внимание со стороны горнопромышленных предприятий.

* Статья подготовлена при выполнении Гос. задания №075-00410-25-00. № гос. рег. 125070908257-0. Тема 1 (2025-2027). Методология обоснования перспектив технологического развития комплексного освоения минерально-сырьевых ресурсов твердых полезных ископаемых России (FUWE-2025-0001).

Огромный ассортимент современной техники и технологий направлен на решение, по сути, единственной проблемы – безопасной и экономически выгодной добычи полезных ископаемых в сложных (неопределенных), меняющихся во времени условиях горного производства.

Известно, что технологические неровности контура горных выработок при ведении буровзрывных работ (БВР) оказывают на порядок большее влияние на величину концентрации напряжений, чем разница в проектной форме сечения выработок. Поэтому для снижения рисков обрушения выработок и уступов используется технология контурного взрывания, позволяющая максимально приблизить их форму к проектным размерам.

Использование технологии контурного взрывания для решения указанной проблемы позволяет не только максимально приблизить угол откоса уступа к предельному значению, но и снизить влияние взрыва на законтурное пространство, снижая нарушенность массива горных пород.

Следует отметить, что в случаях, когда угол откоса уступа превышает «предельный», то на некотором расстоянии от верхней бровки уступа формируется призма обрушения. В зависимости от размеров призмы с течением времени происходят осыпания горных пород. Процесс сдвижения продолжится до тех пор, пока угол наклона уступа не достигнет устойчивого положения. Общий объем обрушившихся пород с учетом объема обрушений на всех уступах борта карьера может достигать нескольких тысяч тонн. Данное обстоятельство не только затрудняет работу действующего предприятия с точки зрения безопасности, но и наносит экономический ущерб, связанный с необходимостью уборки обрушившихся пород.

При достаточно распространенном применении контурного взрывания (как для подземных, так и для открытых условий горного производства) оценка качества сводится к достаточно субъективным показателям. Так, согласно СП 122.13330.2023 «СНиП 32-04-97 Тоннели железнодорожные и автодорожные» эффективность контурного взрывания предлагается оценивать по следам шпуров на обнажившейся части грунта (не менее 75 %).

Другие показатели, применяемые в качестве критериев контурного взрывания, – величина отклонения контура выработки от линии между соседними шпурами (скважинами) [1] или оценка качества с помощью определения коэффициента излишка сечения горной выработки [2] – также не могут дать объективную, а главное, количественную оценку «гладкости» поверхности горных выработок.

В условиях ведения открытых горных работ часто возникает ситуация, когда требуется оценить качество контурного взрывания при отработке уступа карьера по результатам нескольких опытных взрывов с разными параметрами БВР. При этом оценка результатов контурного взрывания зачастую, за неимением других «инструментов», производится визуально. В случае, если результаты опытных взрывов визуально близки, оценка качества контурного взрывания осуществляется с некоторой долей субъективизма. Данное обстоятельство на практике может привести к ошибочному решению при оценке качества контурного взрывания, а следовательно, принимаемым неоптимальным параметрам БВР как с позиций безопасности, так и по экономическим потерям, связанным с необходимостью уборки и вывоза обрушившихся горных пород из-за недостаточной проработки уступа. Таким образом, задачей исследования является обоснование адекватного критерия, позволяющего оценить результаты контурного взрывания.

Методы исследований

В работе [2] обсуждается использование фрактальных характеристик линии контура горных выработок в качестве критерия оценки контурного взрывания. В то же время многочисленными исследованиями доказано, что фрактальная размерность может отра-

жать степень извилистости не только линейных, но и плоскостных или объемных объектов [3 – 6].

В основе определения фрактальной размерности линейного объекта длиной L положен закон Ричардсона [4]:

$$L(\delta) = \alpha \delta^\beta, \quad (1)$$

где α – некоторая константа; β – отрицательный показатель степени; δ – длина отрезков, на которые разбивается исходная линия L .

После преобразований закон Ричардсона выглядит следующим образом:

$$\log L = \beta \log \delta + \log \alpha, \quad (2)$$

где $\log \alpha = \text{const}$.

Тогда, пренебрегая константой, можно записать $\log L \sim \beta \cdot \log \delta$. С другой стороны,

$$\log L = \log[N(\delta) \cdot \delta] = \log N(\delta) + \log \delta, \quad (3)$$

где $N(\delta)$ – число отрезков длиной δ , покрывающих всю линию.

Из уравнений (2) и (3) следует:

$$\log N(\delta) \cong \beta \log \delta - \log \delta = (\beta - 1) \cdot \log \delta \quad (4)$$

Впервые понятие дробной размерности ввел Феликс Хаусдорф в 1919 г. Позднее, в 1975 г., Бенуа Мандельброт назвал объекты с дробной размерностью d_f фракталами.

В соответствии с размерностью Хаусдорфа [4]:

$$N(\delta) \cong 1/\delta^{d_H}, \quad (5)$$

следовательно,

$$\log N(\delta) \sim -d_H \cdot \log \delta. \quad (6)$$

Тогда из уравнений (4) и (6) получим

$$\beta - 1 = -d_H. \quad (7)$$

Принято, что при классическом описании линейных объектов их топологическая размерность d равна 1, плоскостных – $d=2$, объемных – $d=3$. Поскольку в уравнении (1) $\beta < 0$, то размерность Хаусдорфа d_H строго больше топологической размерности d , в соответствии с определением Мандельброта, такие объекты являются фракталами.

Определяя фрактальную размерность объекта, можно оценить степень его неровности (изломанности). И в этом качестве фрактальная размерность может служить надежным количественным показателем при оценке результатов контурного взрывания.

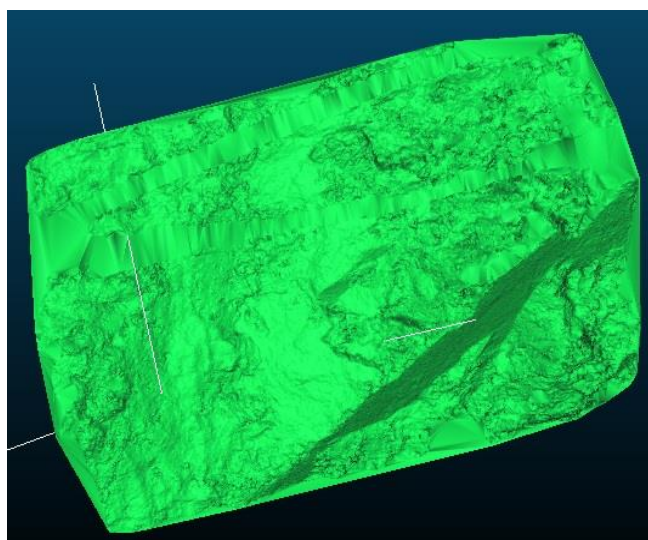
Результаты исследований

В качестве объектов исследования использованы оцифрованные модели, полученные путем компьютерной обработки фотографий сотрудниками ИГД УрО РАН с различных месторождений. Модель стенки горной выработки создана на основе фотографий с месторождения «Бозымчак» (Киргизия), модель поверхности откоса уступа карьера – на основе фотографий с месторождения «Волковское» (Волковский ГОК) (рис. 1).

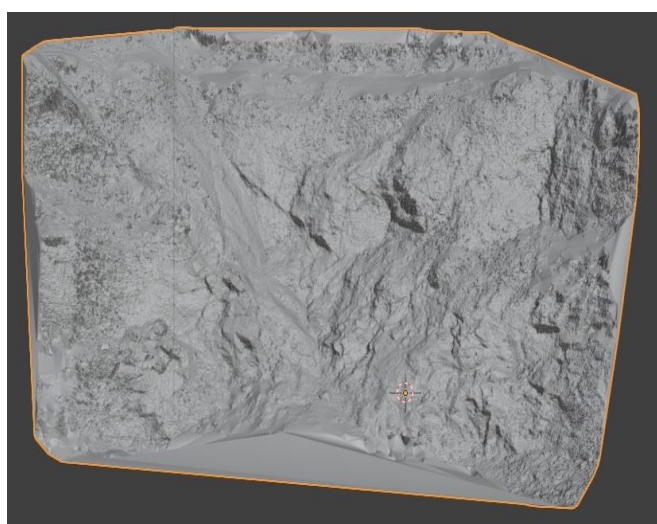
Основное положение фрактальной геометрии состоит в том, что если бесконечно изломанные и, следовательно, нигде не дифференцируемые кривые инвариантны к масштабным преобразованиям, то они обладают дробной размерностью, строго большей топологической размерности.

С учетом вышеизложенного, в случае природных фракталов (типа поверхности стенки горной выработки или поверхности откоса уступа) фрактальная размерность должна оцениваться в диапазоне от 2 до 3.

На практике фрактальная размерность обычно определяется методом покрытия (box-counting method), однако могут быть использованы и другие способы [5 – 10].



а)



б)

Рис. 1. Оцифрованные модели:

- а) стенки горной выработки (месторождение «Бозымчак»);
б) откоса уступа карьера (месторождение «Волковское»)

Классическая процедура определения фрактальной размерности поверхности методом покрытия заключается в следующем. На измеряемую поверхность наносится кубическая сетка с размером ячейки ε . Подсчитывается минимальное количество кубов, покрывающих данную поверхность $N(\varepsilon)$. Фрактальная размерность определяется из соотношения Минковского [11]:

$$d_f = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\varepsilon)}{\log(1/\varepsilon)}, \quad (8)$$

где $N(\varepsilon)$ – минимальное количество элементов, необходимых для полного покрытия поверхности при масштабе ε .

Поскольку исследованный диапазон изменения превышений (от 1 до 0,001 м) исследуемых поверхностей значительный, то для более точного определения неровности поверхностей покрытие рекомендуется производить параллелепипедами. С целью повышения точности определения фрактальной размерности (извилистости поверхности) поверхность стенки горной выработки на месторождении «Бозымчак» покрывалась сеткой

из 11 277 180 точек, а поверхность откоса уступа – сеткой из 10 138 550 точек.

Следует отметить, что расчет фрактальной размерности методом покрытия с сеткой, охватывающей более десяти миллионов точек – это достаточно трудоемкая задача. Для автоматизации процесса расчета сотрудниками ИГД УрО РАН была разработана специальная компьютерная программа, позволяющая произвести расчет автоматически. Порядок выполненных расчетов можно представить в следующем виде:

1. На вход программы подается матрица координат сетки точек, покрывающих поверхность.

2. По минимальным и максимальным координатам матрицы определяются минимальные и максимальные размеры призм покрытия. В нашем случае размеры призм автоматически равномерно распределялись на логарифмической шкале между максимальными и минимальными значениями координат (в случае необходимости они могут быть определены графически (рис. 2 – 3) по формуле $\varepsilon = e^{-x}$, где $x = \log(1/\varepsilon)$ – значение по оси абсцисс).

3. Задается количество «розыгрышей» – вариантов размеров призм, покрывающих исследуемую поверхность (для конкретного расчета $n = 10$, см. точки на рис. 2, 3).

4. Определяется минимальное число призм N (размера ε), необходимых для полного покрытия поверхности. Вычисления повторяются в зависимости от установленного числа «розыгрышей», при этом на каждом этапе вычислений размер (масштаб) призм покрытия уменьшается.

5. Вычисленные значения наносятся на график $\log N = f(\log(1/\varepsilon))$ (см. рис. 2 – 3), угол наклона линии регрессии определит показатель фрактальной размерности d_f (см. рис. 2, 3).

Согласно расчетам, фрактальная размерность стенки горной выработки составила 2,074 (см. рис. 2), а поверхности откоса уступа – 2,206 (см. рис. 3).

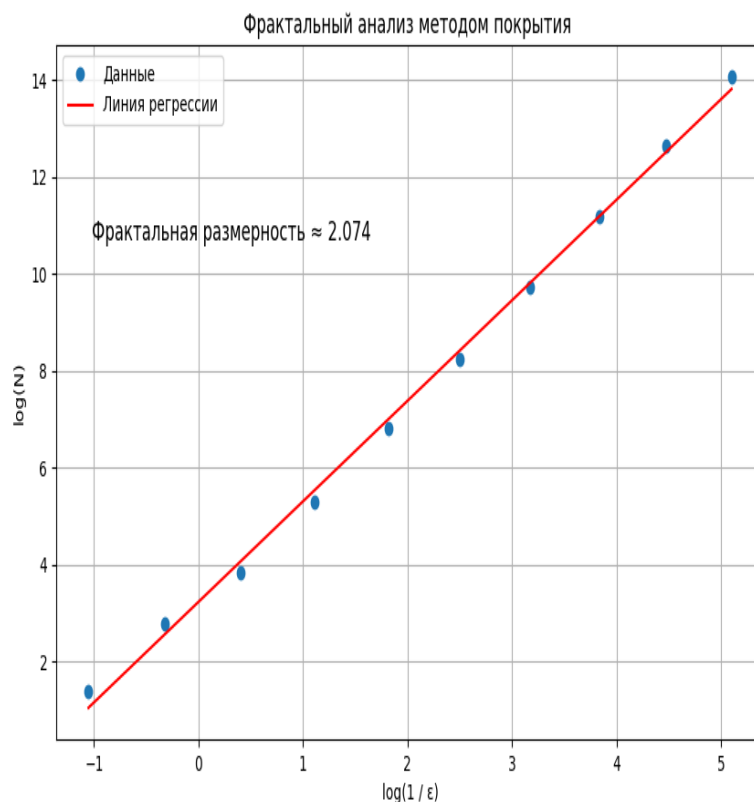


Рис. 2. График уравнения (8) для оцифрованной модели поверхности стенки горной выработки (месторождение «Бозымчак»)

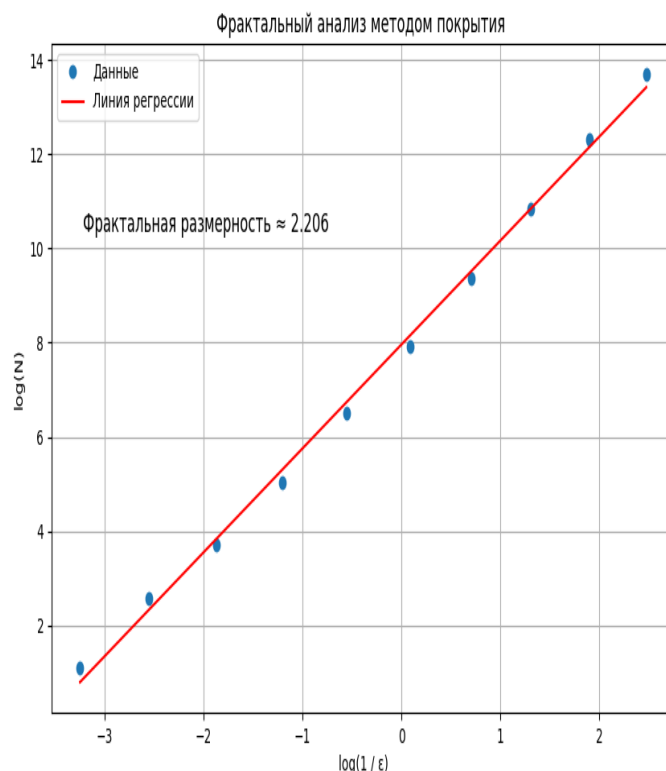


Рис. 3. График уравнения (8) для оцифрованной модели поверхности откоса уступа карьера (месторождение «Волковское»)

Результаты вычислений показывают, что фрактальная размерность, определенная по оцифрованным моделям стенки горной выработки и поверхности уступа, отражает неровности этих поверхностей. При сравнении результатов значение фрактальной размерности стенки горной выработки значительно меньше, чем у поверхности уступа. Данное обстоятельство подтверждает адекватность оценки степени неровности поверхности фрактальной размерностью, поскольку использование метода шпуровых зарядов является более «ювелирным» инструментом при придании формы контура горной выработки или уступу карьера по сравнению с методом скважинных зарядов. Поверхность при шпуровой отбойке будет значительно «глаже», что отражается в результатах расчетов.

Известно, что на устойчивость горных пород влияет большое количество различных факторов, поэтому оценивать качество взрывов по результату единичных взрывов достаточно проблематично. Несколько взрывов с одними и теми же параметрами БВР могут показать достаточно различные результаты. Для объективного анализа результатов контурного взрывания необходима серия взрывов. Использование фрактальной размерности для оценки результатов контурного взрывания позволит оценить результаты как каждого испытания, так и серии в целом при условии использования математического аппарата и исключения доли субъективизма. В этом смысле фрактальная размерность будет являться количественным показателем сформировавшейся поверхности выработки или откоса уступа. Однако предложенная методика оценки гладкости поверхности, сформированной при контурном взрывании с помощью вычисленной фрактальной размерности, не позволяет оценить изменение свойств массива горных пород.

Главной задачей методики является устранение доли субъективизма при оценке качества контурного взрывания. Доля изменчивости свойств массива может быть косвенно оценена путем сравнения средних фрактальных размерностей серии испытаний. В этом случае средняя фрактальная размерность будет отражать среднюю степень изменчивости массива, это позволит получить более объективную информацию о параметрах контурного взрывания в зависимости от нарушенности пород.

Выводы

1. Фрактальная размерность, определенная на основе оцифрованных моделей, позволяет количественно оценить неровности поверхности как стенок горной выработки, так и поверхности откоса уступа.

2. Использование фрактальной размерности в качестве критерия оценки «гладкости» поверхностей горных выработок (как подземных, так и открытых) предоставляет накопленную информацию, являющуюся основой для баз данных о сформированных в результате контурного взрывания поверхностях и для анализа вариативных свойств массива горных пород.

3. Средняя фрактальная размерность будет отражать среднюю степень изменчивости массива и при условии накопления и анализа данных во времени позволит получить более объективную информацию о параметрах контурного взрывания и влиянии БВР в зависимости от нарушенности пород.

Список литературы

1. Петрушин А.Г., Лещуков Н.Н., 2005. Оценка эффективности метода контурного взрывания при проведении выработок в скальных трещиноватых породах. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, № 4, С. 93-96.
2. Латышев О.Г., Прищепа Д.В., 2018. Анализ фрактальных характеристик геометрии горных выработок для оценки качества контурного взрывания. *Горные науки и технологии*, № 3, С. 26-34. DOI 10.17073/2500-0632-2018-3-26-34.
3. Соколов В.В., Франц В.В., Яковлев А.В., 2025. Фрактальный анализ структуры поверхностей трещин. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, № 5, С. 48-57. DOI: 10.21440/0536-1028-2025-5-48-57.
4. Mandelbrot B., 2021. *The fractal geometry of nature*. New York: Echo Point Books & Media, LLC, 490 p.
5. Имашев С.А., Чешев М.Е., 2021. Оценка фрактальной размерности поверхности разрушения образцов горных пород. *Геоинформатика*, № 1, С. 36-44.
6. Сулейманова Л.А., Рябчевский И.С., 2023. Фрактальная размерность формы пор ячеистого бетона. *Университетская наука*, № 2(16), С. 68-70.
7. Feder J., 2013. *Fractals*. NY: Springer, 284 p. DOI: 10.1007/978-1-4899-2124-6
8. Слетков Д.В., Хлебников В.В., Зубаков А.П., 2021. Методы вычисления фрактальной размерности изображений. *Наукосфера*, № 3-2, С. 173-180.
9. Маматов Э.У., Ташполотов Ы., Ибраимов Т.К., 2022. Исследование микрорельефа (фрактальные свойства) поверхности кристаллов базальтовых пород Кызыл-Кийского месторождения КР. *Вестник Ошского государственного университета*, № 1, С. 205-213.
10. Осипов И.С., Сынбулатов В.В., Карасев К.А., 2009. Исследование фрактальной размерности трещин в горных породах. *ГИАБ*, № 1, С. 150-156.
11. Richard M., 1995. *Crownover. Introduction to fractals and chaos*. Boston: Jones and Bartlett Publishers, Inc., 320 p.

References

1. Petrushin A.G., Leshchukov N.N., 2005. Otsenka effektivnosti metoda konturnogo vzryvaniya pri provedenii vyrobotok v skal'nykh treshchinovatykh porodakh . [Evaluation of the effectiveness of the contour blasting method during excavation in rocky fractured rocks]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, № 4, P. 93-96.
2. Latyshev O.G., Prishchepa D.V., 2018. Analiz fraktal'nykh kharakteristik geometrii gornykh vyrobotok dlya otsenki kachestva konturnogo vzryvaniya [Analysis of fractal characteristics of the geometry of mine workings to assess the quality of contour blasting]. *Gornye nauki i tekhnologii*, № 3, P. 26-34. DOI 10.17073/2500-0632-2018-3-26-34.

3. Sokolov V.V., Frants V.V., Yakovlev A.V., 2025. Fraktal'nyi analiz struktury poverkhnostei treshchin. [Fractal analysis of the structure of crack surfaces]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii . Gornyi zhurnal, № 5, P. 48–57. DOI: 10.21440/0536-1028-2025-5-48-57.
4. Mandelbrot B., 2021. The fractal geometry of nature. New York: Echo Point Books & Media, LLC, 490 p
5. Imashev S.A., CHeshev M.E., 2021. Otsenka fraktal'noi razmernosti poverkhnosti razrusheniya obraztsov gornykh porod [Assessment of the fractal dimension of the fracture surface of rock samples]. Geoinformatika, № 1, P. 36–44.
6. Suleimanova L.A., Ryabchevskii I.S., 2023. Fraktal'naya razmernost' formy por yacheistogo betona . [Fractal dimension of the shape of pores of cellular concrete]. Universitetskaya nauka, № 2(16), P. 68–70.
7. Feder J., 2013. Fractals. NY: Springer, 284 p. DOI: 10.1007/978-1-4899-2124-6
8. Sletkov D.V., KHlebnikov V.V., Zubakov A.P. 2021. Metody vychisleniya fraktal'noi razmernosti izobrazhenii [Methods for calculating the fractal dimension of images]. Naukosfera, № 3-2, P. 173–180.
9. Mamatov E.U., Tashpolotov Y., Ibraimov T.K., 2022. Issledovanie mikrorel'efa (fraktal'nye svoistva) poverkhnosti kristallov bazal'tovykh porod Kyzyl-Kiiskogo mestorozhdeniya KR . [Investigation of the microrelief (fractal properties) of the crystals' surface of basalt rocks of the Kyzyl-Kiy deposit, Kyrgyz Republic]. Vestnik Oshskogo gosudarstvennogo universiteta, № 1, P. 205–213.
10. Osipov I.S., Synbulatov V.V., Karasev K.A., 2009. Issledovanie fraktal'noi razmernosti treshchin v gornykh porodakh [Investigation of the fractal dimension of cracks in rocks]. GIAB, № 1, P. 150–156.
11. Richard M., 1995. Crownover. Introduction to fractals and chaos. Boston: Jones and Bartlett Publishers, Inc., 320 p.