

## Оценка зон влияния тектонических разломов на динамические проявления давления горных пород на хибинских месторождениях апатит-нефелиновых руд

А.Н. ШАБАРОВ, А.Д. КУРАНОВ ✉, В.А. КИСЕЛЕВ

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

✉ Kuranov\_AD@pers.spmi.ru

**Ссылка для цитирования оригинальной статьи:** Shabarov, A.N., Kuranov, A., & Kiselev, V. (2021). Assessing the zones of tectonic fault influence on dynamic rock pressure manifestation at Khibiny deposits of apatite-nepheline ores. *Eurasian Mining*. 3-7. DOI: 10.17580/em.2021.02.01

**Аннотация:** Оценка зон влияния геологических объектов является задачей прогнозирования проявлений динамического горного давления. Под проявлениями горного давления в данной работе понимаются горные всплески и микровзрывы горных пород, а именно координаты зафиксированных очагов разрушения в выработках и столбах в момент регистрации горного взрыва или микровзрыва породы. В работе определяются расстояния от зафиксированных точек проявления динамического горного давления в горных выработках до тектонических разломов в массиве горных пород Кукисвумчоррского апатит-нефелинового рудного поля на Кольском полуострове. Кольский полуостров. Для обработки данных использовались методы статистического анализа равномерности частоты значений расстояний использовались для обработки данных.

**Ключевые слова:** тектонический разлом, горный взрыв, динамические проявления горного давления, устойчивость, подземный рудник, статистика, зона влияния, степень влияния.

## Assessing the zones of tectonic fault influence on dynamic rock pressure manifestation at khibiny deposits of apatite-nepheline ores

Arkadiy N. SHABAROV, Anton D. KURANOV ✉, Vladimir A. KISELEV

Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

✉ Kuranov\_AD@pers.spmi.ru

**Abstract:** Assessing the zones of geologic features influence is a task of dynamic rock pressure manifestation prediction. Under rock pressure manifestations this paper understands rock bursts and micro rock bursts, namely, the coordinates of the recorded damage centers in mine workings and pillars the moment a rock burst or a micro rock burst was recorded. The paper determines the distances from the recorded dynamic rock pressure manifestation points in mine workings to tectonic faults in the rock mass of the Kukisvumchorr apatite-nepheline ore field on the Kola Peninsula. The methods of statistical analysis for the distance value frequency uniformity were used for data processing.

**Keywords:** tectonic fault, rock burst, dynamic rock pressure manifestations, stability, underground mine, statistics, zone of influence, degree of influence.

### Введение

Сложные горно-геологические условия характерны для современной горной практики и в ряде случаев приводят к возникновению тонических и горных всплесков, микровзрывов и ударов. Указанные проявления динамического горного давления (ДГРД) приводят к нарушению технологического процесса или более серьезным последствиям и требуют принятия превентивных мер, основанных на эффективных методах прогнозирования. Однако, несмотря на проводимые в этой области исследования, проблема прогнозирования и предупреждения подобных явлений остается нерешенной [1-4], поскольку, помимо прочего, требует одновременного учета множества факторов [5-19]. Одним из таких факторов является влияние тектонических разломов, размеры этих зон влияния не поддаются прямому измерению и требуют углубленного изучения. Анализ мест образования манифестаций динамического горного давления показал, что эти явления обычно происходят в зонах повышенного горного давления, т.е. вблизи горных выработок [20] и тектонических разломов [21]. Так, при разработке Октябрьского и Талнахского месторождений

\* Перевод подготовлен для повышения интереса русскоязычной аудитории к данной статье.

© This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

© Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (перевод), 2025.

было установлено, что основное влияние на развитие зон аномальных напряжений и опасности разрыва пород в рудной залежи и столбах оказывают разломы 1-го и 2-го типов (по классификации ВНИМИ) [22]. Однако ничего не говорится о размерах и степени влияния зон аномальных напряжений и разрывной опасности пород в рудном месторождении. На основании опыта разработки Кизеловского бассейна, Кузнецкого бассейнов, Шурабского месторождения и Сучанского месторождения И.М. Петухов и др. [20] установили, что в пределах зоны крупных разломов существует зона шириной 15-20 м, содержащая породу и уголь со слабыми механическими свойствами. Основное влияние тектонического разлома на распределение напряжений в угольном пласте отмечается при ведении горных работ в непосредственной близости от него, особенно при сближении в процессе отбойки. Однако о степени влияния зоны ничего не говорится. А.С. Батугин [23] установил, что тектонофизическими условиями тектонического разрыва пород и проявления техногенных землетрясений на месторождениях являются: благоприятная ориентация дислокаций разломов в современном или техногенном поле напряжений, наследственность поля напряжений (готовность массива пород к деформации путем смещения вдоль существующих поверхностей слабости), снижение нормального сжатия стенок разломов при вхождении их в зону геомеханической разгрузки или при их затоплении, большой горизонт и высокий уровень тектонических напряжений в массиве пород. В.Н. Филиппов [24] установил, что динамические явления развиваются при перераспределении высоких напряжений, а также при разрыве опасных пород, тектонических разломов и рудно-породных контактов. Ширина опасных зон вокруг тектонических разломов на месторождениях Таштагол и Шерегеш колеблется в пределах 5-20 и 65 м соответственно.

Анализ литературных источников показывает, что размеры зон влияния существенно различаются на разных месторождениях и в разных горно-геологических условиях. Поэтому проблема оценки зон влияния тектонических разломов на проявление динамического горного давления для конкретного месторождения или групп аналогов является актуальной.

Цель исследования – оценить зоны влияния тектонических разломов на проявление динамического горного давления.

В связи с этим необходимо решить следующие задачи:

- 1) определить оптимальное количество интервалов в исходных данных;
- 2) оценить степень и размеры зон влияния тектонических разломов на проявление динамического горного давления.

### Методы исследования

Объектом исследования стал горный массив апатит-нефелинового рудного поля Кукисвумчорр на Кольском полуострове. Динамические проявления горного давления регистрировались на разных высотах подземных выработок рудника им. Кирова (рис. 1).

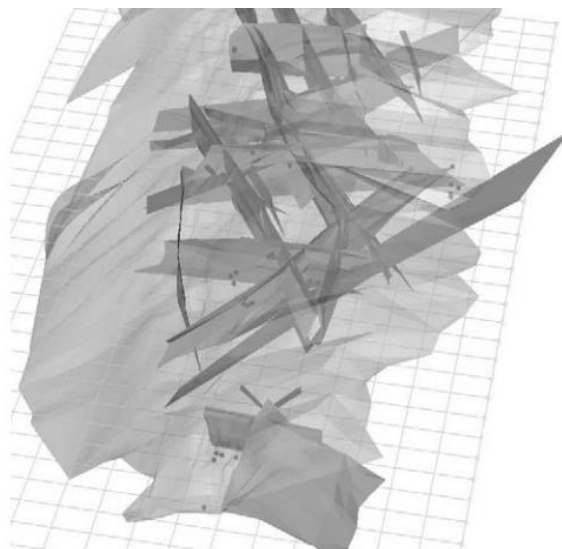


Рис. 1. Точки зафиксированных проявлений проявления горного давления в динамической форме в геолого-структурной модели Кукисвумчоррского месторождения

Исходный массив данных формировался путем измерения длин перпендикуляров, опущенных из центров проявлений динамического горного давления на тектонические разломы. Измерения проводились на цифровых горизонто-ориентировочных планах.

Для анализа исходных данных и определения количества диапазонов, на которые следует разделить исходный массив данных, использовались методы математической статистики:

Формула Стерджеса [25]:

$$k = 1 + \log_2 n, \quad (1)$$

где  $n$  – количество результатов измерений для величины, соответствующей нормальному распределению;  $k$  – количество классов, используемых для построения гистограммы.

В формуле используется биномиальное распределение для аппроксимации нормального распределения, что не всегда применимо, если количество измерений меньше 200.

Формула Скотта (Скотт, 1979) [26]:

$$h = 3,5sn^{-1/3}, \quad (2)$$

где  $h$  – длина диапазона,  $s$  – стандартное отклонение значений серии измерений.

Формула Фридмана-Диакониса (Фридман и Диаконис, 1981) [27]:

$$h = 3,5(IQ)n^{-1/3},$$

где  $h$  – длина диапазона;  $IQ$  – разница между верхним и нижним квартилями.

Для обоснования количества диапазонов, на которые был разбит исходный набор данных, использовался метод функционала качества классификации [28]:

$$Q: \Theta \rightarrow R, \quad (3)$$

где  $Q$  – множество всех возможных систем классов.

В качестве функционала качества классификации для заданного числа классов  $k$  использовалась взвешенная сумма внутриклассовых дисперсий:

$$Q_1(S) = \sum_{i=1}^k \sum_{X_j \in S_i} d^2(X_j, \bar{X}(l)), \quad (4)$$

где  $\bar{X}(l) = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n}$ ;  $d$  – метрика пространства признаков  $Sp(X)$ ;  $S = (S_1, S_2, \dots, S_k)$  – некоторая фиксированная категоризация наблюдений  $X_1, X_2, \dots, X_n$  в заданное число  $k$  классов  $S_1, S_2, \dots, S_k$ .

Для проведения анализа однородности значений массива данных (частот возникновения горных ударов) внутри интервалов была использована статистика Д.А. Родионова  $v_k$  [30]:

$$v_k = \frac{n-1}{kn(n-k)} \sum_{j=1}^m \frac{\left[ (n-k) \sum_{i=1}^k x_{ij} - k \sum_{i=k+1}^n x_{ij} \right]^2}{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2 - \frac{1}{2} \left( \sum_{i=1}^n x_{ij} \right)^2}, \quad (5)$$

где  $k$  – номер наблюдения, после которого порог делит набор наблюдений на две части,  $k = 1, 2, \dots, n-1$ ;  $n$  – строки (количество наблюдений);  $m$  – столбцы (количество признаков);  $x_{ij}$  – матрица объект-функция.

Для статистических расчетов использовалась программа SECTIONS [30].

### Результаты исследования

На основе анализа горно-геологических условий и результатов регистрации динамических проявлений горного давления был сформирован вариационный ряд расстояний от проявлений до тектонических разломов (табл. 1), а также построен график зависимости количества зарегистрированных проявлений горного давления от расстояния от тектонического разлома до места проявления горного давления (рис. 2).

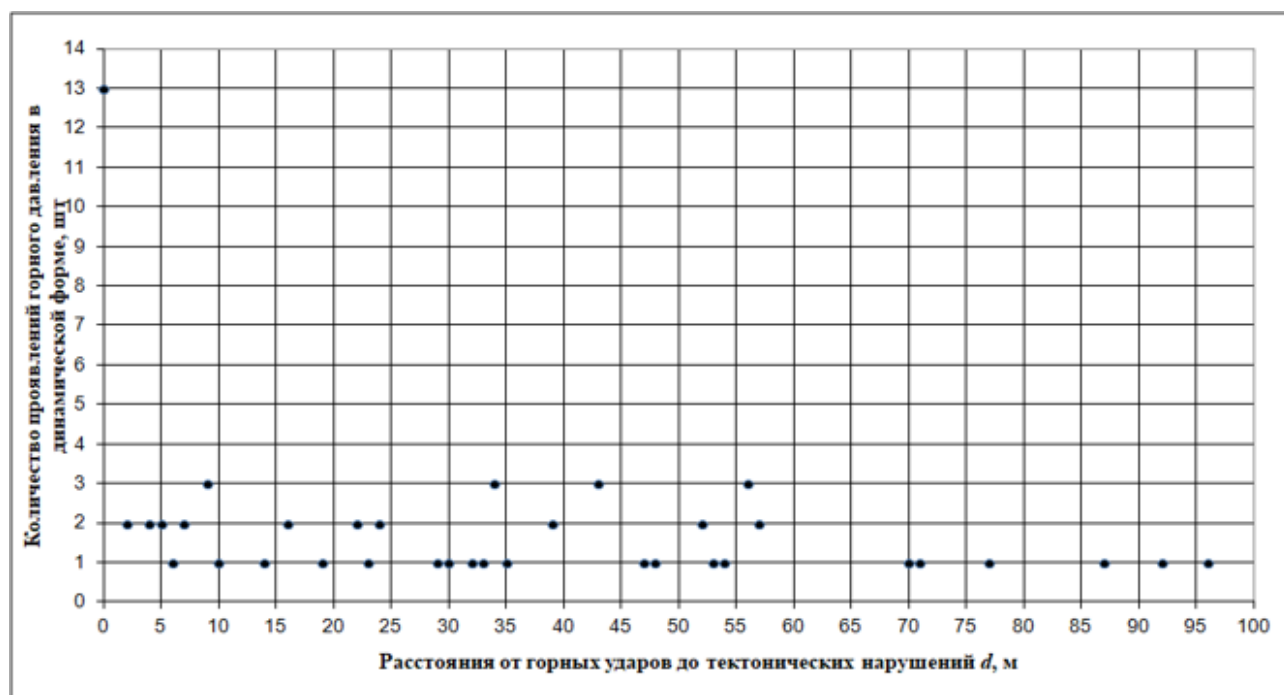


Рис. 2. График зависимости количества зафиксированных проявлений горного давления в динамической форме от расстояния между тектоническим нарушением и местом проявлений горного давления:  
а – полный график зависимости; б – график зависимости после исключения части массива данных

Таблица 1

#### Расстояния от тектонических разломов до мест проявления динамического горного давления

$d, m$	0	2	4	5	6	7	9	10	14	16	19	22	23	24	29	30	32	33	34	35	39	43	47	48
$n$	13	2	2	2	1	2	3	1	1	2	1	2	1	2	1	1	1	1	3	1	2	3	1	1
$d, m$	52	53	54	56	57	70	71	77	87	92	96													
$n$	2	1	1	3	2	1	1	1	1	1	1													

В работе рассматривается вопрос о влиянии тектонических разломов выходящего за их пределы, поэтому число ПГ ДДФ, зарегистрированных непосредственно в тектонических разломах  $d = 0$  м (нулевая зона), были исключены из исходного набора данных. Поэтому для дальнейшего анализа были приняты значения вариационного ряда, начиная с  $d = 2$  м.

Для решения первой задачи были рассчитаны значения номеров диапазонов для различных способов категоризации исходного набора данных (табл. 2).

Таблица 2

#### Определение количества диапазонов категоризации исходного набора данных

N	Название метода	Длина интервала $h$ , м	Количество интервалов $k$
1	Формула Стерджесса		7
2	Формула Скотта	23,2	4
3	Формула Фридмана-Дианониса	21,7	4
4	Функционал при $\alpha = 0,05$		3

Для объективного определения количества диапазонов, на которые должен быть разбит исходный набор данных, использовался метод функционалов качества классификации. Исходный набор данных в строке  $d$  таблицы 1, начиная с  $d = 2$  м, последовательно делился на 1, 2, ..., 9 диапазонов, для которых вычислялись значения функционала  $Q(S)$ . Результаты представлены в табл. 3 и на рис. 3, а. Из рисунка видно, что функционал незначительно изменяется при разбиении исходного набора данных на 3 интервала и более.

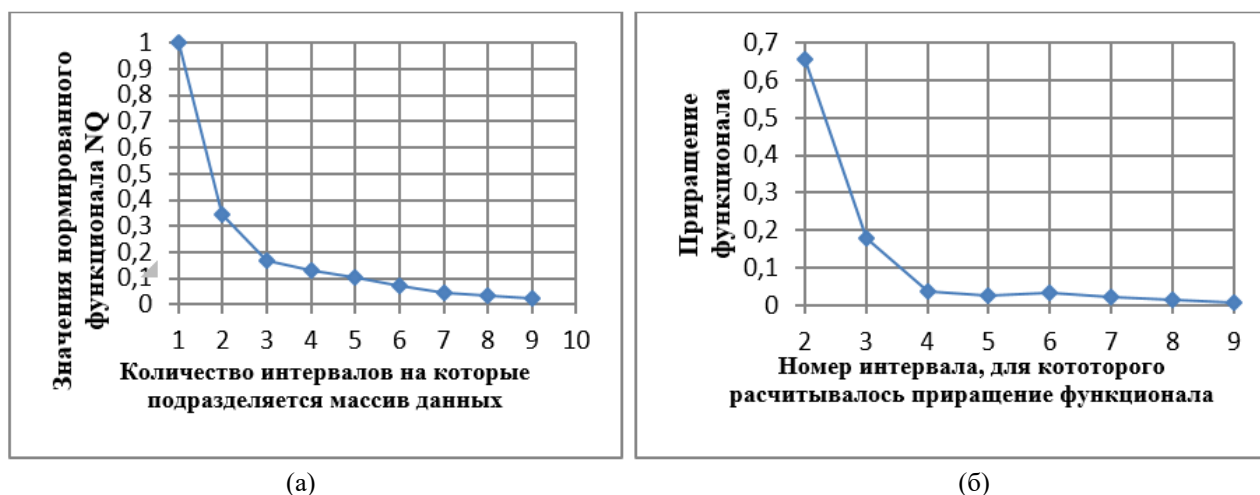


Рис. 3. Зависимость значений функционала  $Q_1(S)$  от количества диапазонов категоризации набора данных (а) и значений функциональных приращений (б)

Для уточнения оптимального количества диапазонов категоризации был построен график приращения значений функционала (рис. 3, б). Из рисунка видно, что при разбиении исходного массива данных на 3 интервала и более приращение функционала составляет два знака после запятой. Таким образом, при дальнейшем разбиении набора данных на диапазоны 4, 5, 6 и т. д. функциональные значения практически не отличаются. Поэтому рационально весь исходный набор данных разделить не более чем на 3 диапазона (зоны) (табл. 2).

Таблица 3

#### Значения нормированного функционала и его приращений

N	Нормированное значение $\check{Q}(S)$	Номер интервала $\check{A}Q(S)$	Приращение $\check{A}Q$
1	1		
2	0,345257	2	0,654743
3	0,166574	3	0,178683
4	0,128763	4	0,037811
5	0,102374	5	0,026388
6	0,069	6	0,033374
7	0,047163	7	0,021837
8	0,031648	8	0,015515
9	0,026204	9	0,005444

Для объективной оценки зон влияния тектонических разломов был проведен статистический анализ однородности частотных значений по критерию Родионова [4]. Были получены следующие значения (табл. 4, 5).

Таблица 4

#### Размеры зон влияния тектонических разломов при $a = 0.1$ и $c_2 = 2.71$

Номер зоны	Количество зафиксированных проявлений горного давления в динамической форме $m$	Ширина зоны $l$ , м	$m/l$	$w$
1	9	7	1,286	0,17
2	3	1	3	0,39
3	29	48	0,6046	0,08
4	5	2	2,5	0,33
5	6	27	0,2226	0,03
		Всего	7,6126	1

Однородные зоны по критерию Д. А. Родионова при  $\alpha = 0,1$ 

$\alpha = 0.1$	d, m	2	4	5	6	7	9	10	14	16	19	22	23	24	29	30	32	33	34	35	39	43	47	48	52	53	54	56	57	70	71	77	87	92	96
$\gamma = 2.705543$	m	2	2	2	1	2	3	1	1	2	1	2	1	2	1	1	1	1	3	1	2	3	1	1	2	1	1	3	2	1	1	1	1	1	1

Учитывая количество рассчитанных ранее полигонов, а также значения  $w$  (табл. 4), было принято решение объединить 1-ю и 2-ю, а также 3-ю и 4-ю зоны (табл. 6). Окончательно объединив нулевую и 1-ю зоны, мы получаем следующие размеры зон и степень влияния тектонических разломов в них (табл. 7).

Таблица 6

Размеры зон влияния тектонических нарушений после объединения зон

Номер зоны	Количество зафиксированных проявлений горного давления в динамической форме $m$	Ширина зоны $l$ , м	$m/l$	$w$
1	12	9	1,333333	0,59
2	34	48	0,708333	0,319
3	6	27	0,222222	0,0989
Всего	52		2,263889	1

Таблица 7

Размеры зон влияния после объединения нулевой и первой зон

Номер зоны	Количество зафиксированных проявлений горного давления в динамической форме $m$	Ширина зоны $l$ , м	$m/l$	$w$	Округленное значение $w$
1	25	9	3,125	0,78	0,8
2	34	48	0,68	0,16	0,15
3	6	27	0,222	0,05	0,05
Сумма	52		4,027	1	1

## Выводы

В статье приведены данные статистического анализа расстояний от тектонических разломов до проявлений динамического горного давления, зафиксированных в массиве горных пород Кукисвумчоррского апатит-нефелинового рудного поля. На основе статистических расчетов и сравнительного анализа установлено, что количество диапазонов, на которые следует разбить исходный массив данных, варьирует от 3 до 4. На основе критерия однородности массива данных, по методике Д.А. Родионова, оценены размеры зон влияния тектонических разломов на проявление динамического горного давления. Размеры зон и степень влияния оказались следующими: 1-я зона шириной 9 м со степенью влияния 0,8, 2-я зона шириной 48 м со степенью влияния 0,15, 3-я зона шириной 27 м со степенью влияния 0,05. Зоны градации влияния с соответствующей степенью влияния следует рассматривать как новые результаты. Несмотря на то, что размеры зон определялись для конкретных горно-геологических условий, они могут быть использованы для прогноза проявлений динамического горного давления на каждом Хибинском апатит-нефелиновом месторождении Кольского полуострова.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Shabarov A., Kuranov A., Popov A., Tsirel S. Geodynamic risks of mining in highly stressed rock mass. *E3S Web of Conferences: 1st International Scientific Conference*. Vladivostok : EDP Sciences, 2019. Vol. 129. DOI: 10.1051/e3sconf/201912901011
2. Kozyrev A. A., Panin V. I., Semenova I. E., Zhuravleva O. G. Geodynamic Safety of Mining Operations under Rockburst-Hazardous Conditions in the Khibiny Apatite Deposits. *Journal of Mining Science*. 2018. Vol. 54, No. 5. pp. 734–743.
3. Li C. C., Mikula P., Simser B., Hebblewhite B., Joughin W. C. Discussions on rockburst and dynamic ground support in deep mines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019. Vol. 11(5). pp. 1110–1118.
4. Rasskazov I. Ju., Saksin B. G., Potapchuk M. I., Anikin P. A. The researches of burst-hazard on mines in Russian far east. *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses*. 2018. Vol. 1. pp. 153–166.

5. Kozyrev A., Konstantinov K. Development of an expressmethod to control damages in underground mining excavations under rockburst hazardous conditions. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management*. 2017. Vol. 17(13). pp. 253–259.
6. Xiaohong L., Xinfei W., Yong K., Zheng H. Artificial Neural Network for Prediction of Rockburst in Deep-Buried Long Tunnel. *International Symposium on Neural Net-works: Advances in Neural Networks*. Chongqing : Springer. 2005. Vol. 3498. pp. 983–986.
7. Rasskazov I., Saksin B., Usikov V., Sidlyar A. The assessment of the impact of natural and anthropogenic factors on the current stress-strain state of rock massifs of burst-hazardous ore deposits in the East of Russia. *E3S Web of Conferences*. France : EDP Sciences, 2018. Vol. 56. DOI: 10.1051/e3sconf/20185602011
8. He M., Ren F., Liu D. Rockburst mechanism research and its control. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018. Vol. 28(5). pp. 829–837.
9. Bashkov V. I., Khristolyubov E. A., Eremenko A. A., Filippov V. N., Konurin A. I. Substantiation of mining system parameters for rock-burst hazardous blind iron ore bodies in Gornaya Shoria. *GIAB*. 2018. No. 3. pp. 18–31.
10. Eremenko A. A., Konurin A. I., Shtirts V. A., Prib V. V. Identification of higher rock pres-sure zones in rockburst-hazardous iron ore deposits. *Gornyi Zhurnal*, 2020. No. 1. pp. 78–81. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.15
11. Zhou J., Li X., Mitri H.S. Classification of rockburst in underground projects: Comparison of ten supervised learning methods. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2016. Vol. 30(5). DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000553
12. Driad-Lebeau L., Lahaie F., Marwan A., Josien J.P., Bigarre P. Seismic and geotechnical investigations following a rockburst in a complex French mining district. *International Journal of Coal Geology*. 2005. Vol. 64(1). pp. 66–78.
13. Yin-hui Z. The study of acoustic emission (AE) forecasting coal and rock disaster tech-nique. *Journal of Coal Science and Engineering*. 2009. Vol. 15. pp. 157–160.
14. Yunyun X., Dongqiang X. The Study of Forecasting Model of Rock Burst for Acoustic Emission Based on BP Neural Network and Catastrophe Theory. *Advances in Neural Network Research and Applications*. 2010. pp. 11–19. DOI: 10.1007/978-3-642-12990-2\_2
15. Wei G. Time Serial Model of Rock Burst Based on Evolutionary Neural Network. *International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence*. Sanya : Springer, 2010. pp. 406–413.
16. Meifeng C. Prediction and prevention of rockburst in metal mines – A case study of Sanshandao gold mine. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. Vol. 8. 2016. pp. 204–211.
17. Zhou J., Xibing L., Xiuzhi S. Long-term prediction model of rockburst in underground openings using heuristic algorithms and support vector machines. *Safety Science*. 2012. Vol. 50. pp. 629–644.
18. Shuren W., Chunyang L., Wenfa Y., Zhengshen Z., Wenxue C. Multiple indicators prediction method of rock burst based on microseismic monitoring technology. *Arabian Journal of Geosciences*. 2017. Vol. 10(6). DOI: 10.1007/s12517-017-2946-8
19. Ermakov N. I. Rock burst causes at ore fields (by the example of the North Urals Bauxite Mine). *GIAB*. 2001. No. 8. pp. 218–228.
20. Petuhov I. M., Litvin V. A., Kucherski L. V. et al. 20. Rock bursts and ways of controlling them at the mines of the Kizel coal basin. Perm, 1969. 397 p.
21. Lovchikov A. V. Mine-tectonic rock bursts at the Lovozersky rare-metal deposit. *Vestnik of MSTU*. 2008. Vol. 11, No. 3. pp. 385–392.
22. Kosuhin N. N. Predicting rock burst hazard of a rock mass when mining in the zones of tectonic fault influence: thesis of inauguration of Dissertation ... of Candidate of Engineering Sciences. – Saint-Petersburg : NMU Gornyi, 2016. – 22 p.
23. Batugin A. S. To the mechanism of manifestation of fault displacement movement in tectonic rock bursts. *Collection of studies*. Saint-Petersburg : VNIMI, 1994. pp. 157–160.
24. Filippov V. N. Improving the efficiency of carrying out and supporting developing and face entries in the zones tectonic faults at iron-ore deposits : thesis of inauguration of Dissertation ... of Candidate of Engineering Sciences. – Novosibirsk : SB RAS, 2011. – 23 p.
25. *Applied statistics reference*. Ed. by E. Lloyd, U. Lederman. Moscow : Finansy i statistika, 1990. 526 p.
26. David W. S. On Optimal and Data-Based Histograms. *Biometrika*. 1979. Vol. 66, No. 3. pp. 605–610.
27. Freedman D., Diaconis P. On this histogram as a density estimator: L2 theory. *Zeitschrift fur wahrscheinlichkeitstheorie und verwandte gebiete*. 1981. Vol. 57. pp. 453–476.
28. Ayvazyan S. A., Buhstaber V. M., Enyukov I. S., Meshalkin L. D. Applied statistics: classification and dimensionality decreasing. Reference book. Moscow : Finansy i statistika, 1989. 607 p.
29. Rodionov D. A., Kogan R. I., Golubeva V. A., Smirnov B. I. Sirotinskaya S. V. Reference on mathematical methods in geology. Moscow : Nedra, 1978. 335 p.
30. Kiselev V. A., Tsvetkova I. V. Creating zoning maps by means of GIS based on the determination of the multivariable dataset statistical homogeneity. *Gornyi Zhurnal*. 2008. No. 5. pp. 42–50.