УДК 622.83

О.Г. Журавлева, И.М. Аветисян, А.В. Земцовский

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА В УДАРООПАСНЫХ УСЛОВИЯХ

Представлены результаты исследования изменения состояния массива при ведении подземных горных работ в условиях удароопасных месторождений на примере Юкспорского апатит-нефелинового месторождения Хибинского массива. Применялись методы кластерного анализа сейсмической активности и численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород. Кластерный анализ позволяет выделить группы сейсмических событий и оценить их взаимосвязь с горно-геологическими факторами. Метод численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород на протяжении нескольких десятков лет успешно применяется на рудниках Хибин. Данный метод позволяет оценить состояние массива при различных геологических и горнотехнических условиях, а также выполнить перспективный прогноз формирования зон концентрации напряжений при определенном состоянии горных работ. Представлены результаты применения комплексного подхода к оценке состояния массива горных пород. Применение такого подхода позволяет проводить более детальное исследование техногенной сейсмичности и дает более точную оценку состояния массива горных пород. Конечная цель исследований – улучшение качества прогноза удароопасности.
Ключевые слова: удароопасность, сейсмичность, кластерный анализ, численное моделирование, напряженно-деформированное состояние.

Введение

Постоянное техногенное воздействие на массив горных пород приводит к изменению в структуре массива и к росту уровня сейсмической активности в пределах отрабатываемых месторождений.

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 4. С. 173–183.
© 2017. О.Г. Журавлева, И.М. Аветисян, А.В. Земцовский.

В основе процессов подготовки и реализации сейсмических событий различного энергетического уровня лежат изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород. Углубление и интенсификация горных работ приводит не только к повышению фонового уровня напряжений на отрабатываемых горизонтах, но и к увеличению по площади и абсолютным величинам зон концентрации напряжений в окрестности продвигающихся фронтов горных работ.

В связи с этим изучение закономерностей изменения параметров геомеханического состояния массива пород с учетом основных геологических и горно-технических факторов является актуальной задачей, решение которой возможно при применении комплекса методов. В данной работе рассматривается комплексирование результатов кластерного анализа сейсмических событий с результатами численного моделирования НДС на примере Юкспорского месторождения, разрабатываемого Кировским рудником АО «Апатит».

Комплексирование сейсмических данных и результатов численного моделирования НДС массива позволяет более точно оценить геомеханическое состояние массива горных пород, установить причину возникновения динамических явлений, а также повысить качество оценки потенциально удароопасных зон при планировании горных работ. Совпадение зон, опасных как по уровню сейсмичности, так и по уровню действующих напряжений, увеличивает надежность отнесения таких участков к удароопасным, что при разработке соответствующих мероприятий повышает безопасность горных работ. Основной сложностью при совместном анализе сейсмических данных и расчетных параметров поля напряжений является необходимость комплексирования непрерывных и дискретных данных. Ранее для рудников Хибинского массива, в основном, анализировались совмещенные карты распределения напряжений при определенной конфигурации очистных выемок с картами сейсмических событий [1].

Объект исследования

Кировский рудник АО «Апатит» (*Кр*) ведет отработку Кукисвумчоррского и Юкспорского апатит-нефелиновых месторождений подземным способом. Разделителем рудного тела на два месторождения является Саамский разлом – разрывное нарушение, мощность зоны которого в пределах рудника в среднем – 10–40 м. В настоящее время в отработке находятся несколько горизонтов.

Отработка данных месторождений ведется в удароопасных условиях [2, 3]. В целях обеспечения безопасности горных работ проводится сейсмический мониторинг. На Кировском руднике установлена автоматизированная система контроля состояния массива (АСКСМ), в районах повышенной точности которой обеспечена регистрация сейсмических событий с энергией 10^3–10^9 Дж. Погрешность расчета координат гипоцентра – не более 25 м.

Также на руднике установлено программное обеспечение, которое позволяет выполнить прогнозную оценку состояния массива на основе численного моделирования НДС при текущем и планируемом состоянии горных работ.

Методы исследования

Многолетними исследованиями установлено, что сейсмические события на рудниках проявляются неравномерно и зачастую представляют собой скопления близкорасположенных событий, которые могут рассматриваться как кластеры. Такие кластеры могут быть приурочены к какой-либо геологической структуре, месту ведения горных работ, либо могут образовываться под влиянием нескольких факторов как природных, так и техногенных. Важной задачей является не только определение числа кластеров, но и возможность дальнейшего изучения каждого кластера в отдельности.

Кластерный анализ зарегистрированных сейсмических событий позволяет разрабатывать классификации этих событий; проводить исследования схем группирования сейсмособытий; формулировать гипотезы возникновения сейсмических событий и осуществлять оценку выдвинутых гипотез.

Существуют различные методы кластерного анализа групп данных. Их разнообразие объясняется как разными вычислительными методами, так и различными концепциями, лежащими в основе кластеризации. Основным критерием выбора того или иного метода кластеризации является практическая полезность результата.

Большинство значительных сейсмических событий относятся к конкретным сейсмическим источникам на руднике, что может являться основой методики кластерного анализа, т.е. сейсмические источники можно выделить с помощью кластерного анализа сейсмических данных [4].

Большой объем данных сейсмических наблюдений с одной стороны и предварительное представление относительно числа

кластеров сейсмособытий с другой стороны обуславливают выбор метода кластерного анализа *k*-средних [5]. В общем случае с помощью данного метода строится ровно *k* различных кластеров, расположенных на возможно больших расстояниях друг от друга. Таким образом, целью является разбиение сейсмических событий на группы событий, характеризующиеся одинаковой или схожей причиной возникновения, которая впоследствии изучается более детально при выполнении многоэтапного анализа.

В последнее время с ростом мощностей вычислительной техники большую популярность получили численные методы исследования геомеханических процессов в массиве. Для этих методов характерны универсальность, применимость для широкого класса случаев и относительная простота вычислений [6–8]. Применение численных методов моделирования позволяет осуществлять перспективный прогноз НДС при определенном состоянии горных работ. При разработке моделей месторождений и постановке граничных условий используются данные натурных исследований массива пород и различные варианты выемки полезных ископаемых. В качестве метода расчетов применяется метод конечных элементов в объемной постановке с использованием программного комплекса Sigma GT, разработанного в Горном институте КНЦ РАН [9].

Программный комплекс позволяет проводить последовательные экспертные оценки состояния массива на разных масштабных уровнях, осуществлять прогноз формирования зон концентрации напряжений, а также с необходимой степенью обоснованности разрабатывать и принимать технические решения, обеспечивающие снижение вероятности возникновения динамических форм проявлений горного давления. Параметры очистной выемки выбираются с учетом фактического состояния горных работ на руднике для различных временных периодов.

Результаты исследования

За последние несколько лет сейсмоактивность Юкспорского крыла *Кр* значительно возросла (рис. 1). Рост сейсмической активности обусловлен с одной стороны сближением двух фронтов горных работ. С другой стороны, в висячем боку рудной залежи, по-видимому, происходит формирование трещин отрыва.

В 2014 г. отработка запасов велась встречными фронтами. Горные работы на горизонте +320 м проводились в стыковочной зоне по специально разработанному регламенту и проекту.

В 1 квартале 2015 г. на данном горизонте создалась проблемная ситуация. Фактическое развитие горных работ привело к образованию целика в районе разрезов Р11+30 ÷ Р12 (рис. 2), негативно влияющего на устойчивость выработок и безопасность ведения горных работ в данной области массива. В сложившейся ситуации нормальное ведение очистных работ было затруднено.

Для анализа сложившейся ситуации было выполнено численное моделирование НДС массива. Было установлено, что при состоянии горных работ на 3–4 кв. 2014 г. концентрации максимальных напряжений приурочены к фронтам горных работ (рис. 3, *а*). Значения напряжений достигали 50–60 МПа.

В 1 кв. 2015 г. при дальнейшем развитии горных работ и образовании целика между горизонтами значения напряжений в данной зоне увеличились до 100 МПа (рис. 2, 3 *б*), что свидетельствует о потенциальной удароопасности данного участка массива.

Для более детального исследования изменений состояния массива было выполнено комплексирование результатов численного моделирования с данными сейсмического мониторинга.

Проведен многоэтапный кластерный анализ сейсмических событий, зарегистрированных на Юкспорском крыле *Кр* в течение рассматриваемого периода времени, который позволил выделить события, приуроченные к отрабатываемому горизонту +320 м. Например, были исключены группы сейсмических событий, происходящие в лежачем боку и в висячем боку месторождения.

Кластеры, приуроченные к отрабатываемому горизонту +320 м, разделены на группы.

Первая группа кластеров сейсмических событий – это события, проявляющиеся вдоль мончикитовой дайки, вблизи которой при прохождении выработок и ранее возникали трудности (ниже по магистрали). Таким образом, сейсмоактивность вблизи дайки относительно постоянна: сейсмические события мигрируют вдоль дайки в течение длительного времени, а их энергия, как правило, не превышает 10^4 Дж.

Вторая группа кластеров сейсмических событий – это сейсмическая активность вблизи проблемного участка массива.

В 3 кв. 2014 г. (рис. 4) сейсмические события были приурочены в основном к зоне повышенных напряжений. Средняя энергия составила $3.6 \cdot 10^4$ Дж, что соответствует фоновому уровню сейсмической активности при ведении горных работ.

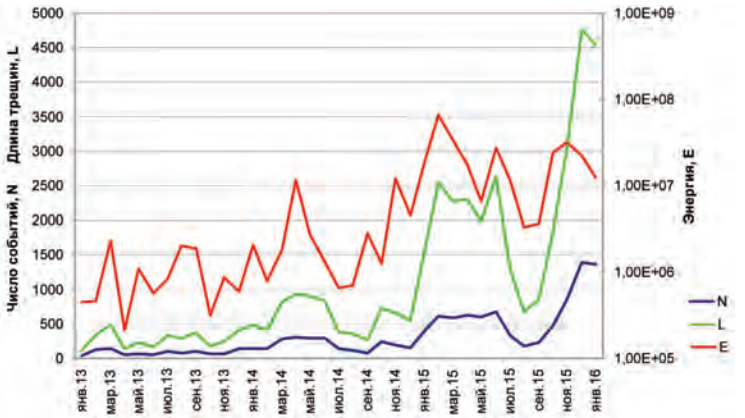

Рис. 1. Сейсмичность Юкспорского крыла Кр

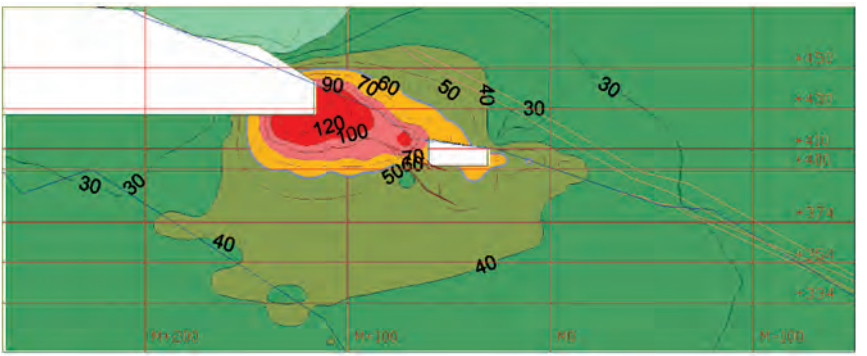

Рис. 2. Распределение максимальной компоненты главных напряжений (вертикальное сечение по разрезу 11+60 м), 1 кв. 2015 г.

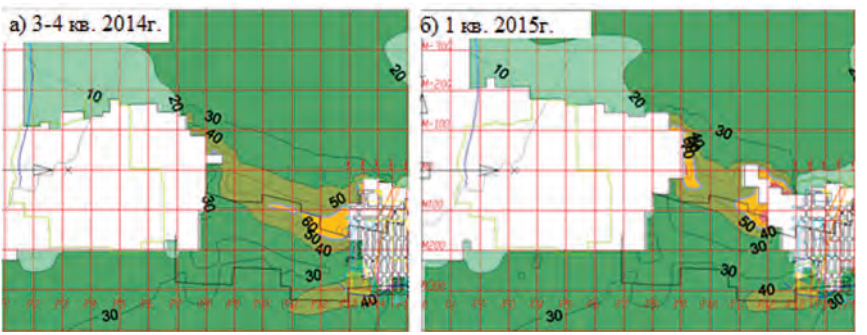

Рис. 3. Распределение максимальной компоненты главных напряжений на гор.+320 м

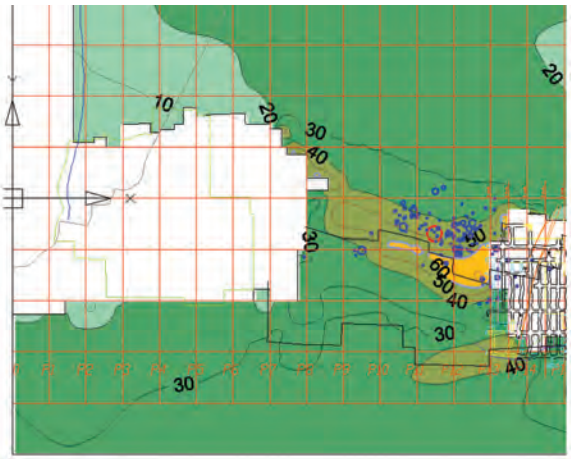

Рис. 4. Распределение максимальной компоненты главных напряжений на гор.+320 м и кластер сейсмических событий (3 кв. 2014 г.)

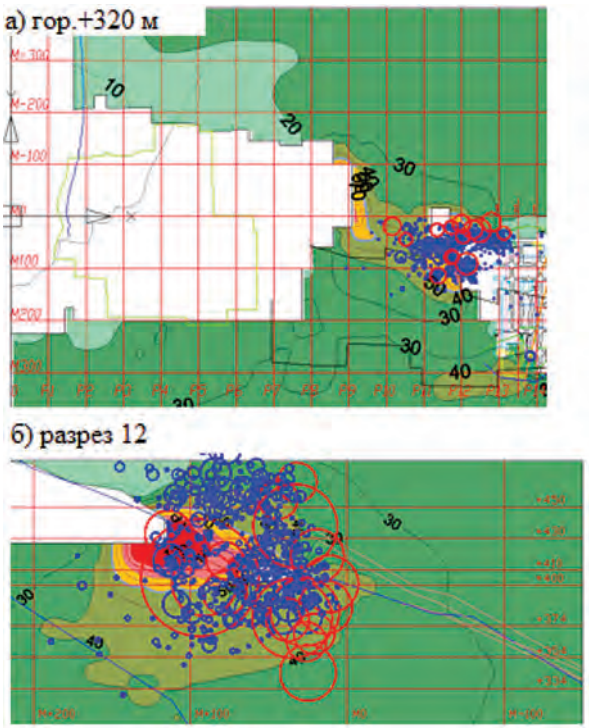

Рис. 5. Карты распределения максимальной компоненты главных напряжений совмещенные с кластером сейсмических событий (1 кв. 2015 г.)

Начиная с 4 кв. 2014 г. в районе отрабатываемого горизонта +320 м наблюдается увеличение уровня сейсмической активности. А в 1 кв. 2015 г. сейсмическая активность возросла значительно, по сравнению с предыдущими периодами наблюдений. Выделены пять кластеров сейсмических событий:

1. Кластер наиболее сильных сейсмических событий, нетипичных для Юкспорского крыла *Кр* как за рассматриваемый период времени, так и за весь период наблюдений. Т.е. в целом, на Юкспорском крыле *Кр* в районе повышенной точности АСКСМ-Кр события с энергией порядка 10^7 Дж и более происходят очень редко, а в рассматриваемый период времени зарегистрировано четыре крупных события в течение одного квартала. Одно из таких событий приурочено к консоли пород висячего бока, а три события зарегистрированы на проблемном участке массива горных пород.

2. Основной кластер сейсмособытий (рис. 5) приурочен к средней отметке +400 м. Зарегистрировано большое число как слабых (энергия от 10^3 Дж до 10^5 Дж), так и сильных сейсмических событий (энергия от 10^6 Дж). В разрезе также видно, что наиболее мощное событие приурочено к зоне повышенной концентрации напряжений, где напряжения в целике достигают 120 МПа.

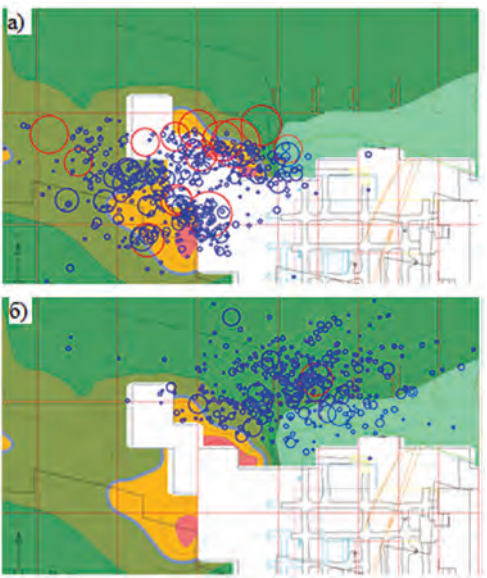

Рис. 6. Распределение максимальной компоненты главных напряжений на гор.+320 м и кластеров сейсмических событий (1 кв. 2015 г.)

3. Кластер сейсмособытий, расположенный вблизи основного кластера и несколько в стороне от проблемного участка.

4. Кластер, приуроченный к нижним подэтажам горизонта (по-видимому, события произошли под влиянием работ на вышележащем подэтаже).

5. Группа событий в массиве горных пород (не зарегистрировано событий с энергией более 10^6 Дж).

Таким образом, получены два наиболее крупных кластера сейсмособытий. Один кластер (основной, высокий уровень сейсмоактивности, рис. 6, *а*) приурочен непосредственно к рассматриваемому проблемному участку массива (средняя энергия событий 10^5 Дж), а второй кластер (рис. 6, *б*) – несколько в стороне от выбранного участка (средняя энергия событий $2 \cdot 10^4$ Дж). Причем граница между кластерами проходит практически по изолинии напряжений 60 МПа (рис. 6).

При дальнейшем развитии горных работ на данном горизонте уровень сейсмической активности снизился. Средняя энергия событий в кластерах не превышает $4 \cdot 10^4$ Дж.

Выводы

В работе представлено комплексирование результатов кластерного анализа сейсмических событий и результатов численного моделирования НДС массива при разработке удароопасных месторождений. Использование сейсмического метода контроля процессов изменения НДС массива горных пород позволяет проследить поведение геологической среды во всех условиях и этапах ее эволюции, в том числе в горнорудных природно-технических системах.

Таким образом, преимущество комплексного подхода с применением кластерного анализа и метода численного моделирования заключается в возможности более детального исследования техногенной сейсмичности и более точной оценке состояние массива горных пород. В будущем такой подход к анализу данных позволит улучшить качество прогноза удароопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Козырев А.А.*, *Журавлева О.Г.*, *Семенова И.Э.* Комплексирование сейсмических данных и результатов численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива для оценки потенциально удароопасных зон при ведении горных работ / Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле». Т. 2. – М.: ИФЗ РАН, 2016. – С. 77–81.

2. *Козырев А.А., Панин В.И., Свинин В.С.* Геодинамическая безопасность при разработке рудных месторождений в высоконапряженных массивах // Горный журнал. – 2010. – № 9. – С. 40–43.

3. *Турчанинов И.А., Марков Г.А., Иванов В.И., Козырев А.А.* Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок. – Л.: Наука, 1978. – 256 с.

4. *Hudyma M.R.*, *Mikula P.A.*, *Owen M.* Seismic Hazard Mapping at Mount Charlotte Mine. Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium. Hammah R., Bawden W.F., Curran J., Telesnicki M. (eds.), University of Toronto Press. 2002. pp. 1087–1094.

5. *Мандель И.Д.* Кластерный анализ. – М.: Финансы и статистика, 1988.

6. *Singh G.S.P.*, *Singh U.K.* A numerical modeling approach for assessment of progressive caving of strata and performance of hydraulic powered support in longwall workings. Computers and Geotechnics, Vol. 36, Issue 7, September 2009, pp. 1142–1156.

7. *Hidalgo K.P., Nordlund E.* Failure process analysis of spalling failure – Comparison of laboratory test and numerical modelling data. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 32, November 2012, pp. 66–77.

8. *Pan P., Feng X.* Numerical study on coupled thermo-mechanical processes in Äspö Pillar Stability Experiment. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 5, Issue 2, April 2013, pp. 136–144.

9. *Козырев А.А.*, *Панин В.И.*, *Семенова И.Э.* Опыт применения экспертных систем оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород для выбора безопасных способов отработки рудных месторождений / Записки Горного института Т. 198. – 2012. – С. 16–23. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Журавлева Ольга Геннадьевна[1] – кандидат технических наук, научный сотрудник, e-mail: ZhuravlevaOG@goi.kolasc.net.ru,
Аветисян Иван Михайлович[1] – кандидат технических наук, научный сотрудник, e-mail: ivanavetisyan@yandex.ru,
Земцовский Александр Васильевич[1] – кандидат технических наук, научный сотрудник, e-mail: zemtsovskiy@yandex.ru,
[1] Горный институт Кольского научного центра РАН.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 4, pp. 173–183.

UDC 622.83

O.G. Zhuravleva, I.M. Avetisyan, A.V. Zemtsovskiy

COMPLEXING OF SEISMIC DATA AND NUMERICAL MODELING RESULTS ON STRESS STATE OF ROCKS UNDER ROCKBURST HAZARD

The paper presents the investigation results of rock mass state change during underground mining under rockburst hazard conditions on the case study of the Yukspor apatite-nepheline deposit located at the Khibiny rock massif. The authors applied the cluster analysis methods

for the investigations seismic activity and numerical modeling methods for the stress-strain state in the rock mass. The cluster analysis allows grouping the seismic events and estimating their correlation with mining-geological factors. The numerical modeling method of the rock mass stress-strain state has been successfully applied on the Khibiny mines during a few decades. The method allows estimating the rock mass state under different geological and mining-engineering conditions as well as carrying out the perspective forecast of stress concentration zones formation under certain mining conditions. The paper presents the results of applying a complex approach for rock mass state estimation. It is shown that applying such approach based on two methods allows carrying out more detail investigation of mining-induced seismicity and gives more exact estimation of the rock mass state. The ultimate goal of the investigations given is to improve the quality of the rockburst hazard forecast.

Key words: rockburst hazard, seismicity, cluster analysis, numerical modeling, stress-strain state.

AUTHORS

Zhuravleva O.G.[1], Candidate of Technical Sciences,
Researcher, e-mail: ZhuravlevaOG@goi.kolasc.net.ru,
Avetisyan I.M.[1], Candidate of Technical Sciences,
Researcher, e-mail: ivanavetisyan@yandex.ru,
Zemtsovskiy A.V.[1], Candidate of Technical Sciences,
Researcher, e-mail: zemtsovskiy@yandex.ru,
[1] Mining Institute of Kola Scientific Centre
of Russian Academy of Sciences, 184209, Apatity, Russia.

REFERENCES

1. Kozyrev A.A., Zhuravleva O.G., Semenova I.E. *Chetvertaya tektonofizicheskaya konferentsiya v IFZ RAN «Tektonofizika i aktual'nye voprosy nauk o Zemle»*. T. 2 (Tectonophysics and Actual Issues of Geosciences: IV Tectonophysical Conference of the Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, vol. 2), Moscow, IFZ RAN, 2016, pp. 77–81.

2. Kozyrev A.A., Panin V.I., Svinin V.S. *Gornyy zhurnal*. 2010, no 9, pp. 40–43.

3. Turchaninov I.A., Markov G.A., Ivanov V.I., Kozyrev A.A. *Tektonicheskie napryazheniya v zemnoy kore i ustoychivost' gornykh vyrabotok* (Tectonic stresses in the earth crust and stability of underground openings), Leningrad, Nauka, 1978, 256 p.

4. Hudyma M.R., Mikula P.A., Owen M. *Seismic Hazard Mapping at Mount Charlotte Mine. Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium*. Hammah R., Bawden W.F., Curran J., Telesnicki M. (eds.), University of Toronto Press. 2002. pp. 1087–1094.

5. Mandel' I.D. *Klasternyy analiz* (Cluster analysis), Moscow, Finansy i statistika, 1988.

6. Singh G.S.P., Singh U.K. A numerical modeling approach for assessment of progressive caving of strata and performance of hydraulic powered support in longwall workings. *Computers and Geotechnics*, Vol. 36, Issue 7, September 2009, pp. 1142–1156.

7. Hidalgo K.P., Nordlund E. Failure process analysis of spalling failure Comparison of laboratory test and numerical modelling data. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 32, November 2012, pp. 66–77.

8. Pan P., Feng X. Numerical study on coupled thermo-mechanical processes in Äspö Pillar Stability Experiment. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 5, Issue 2, April 2013, pp. 136–144.

9. Kozyrev A.A., Panin V.I., Semenova I.E. *Zapiski Gornogo instituta*. 2012, vol. 198, pp. 16–23.