

УДК 550.34 : 622.831

А.А. Козырев, Ю.В. Федотова, О.Г. Журавлева

Вероятностный прогноз сейсмоопасных зон в условиях удароопасных месторождений Хибинского массива

A.A. Kozyrev, Yu.V. Fedotova, O.G. Zhuravlyova

Probabilistic prediction of seismic hazardous zones in rockburst-prone ore mines of the Khibiny massif

Аннотация. Разработана комплексная методика вероятностного прогноза сейсмоопасных зон в условиях удароопасных месторождений Хибинского массива, основанная на совместном использовании различных прогностических критериев потока сейсмической эмиссии. Полученные изменения количества, конфигурации и местоположения выделенных зон отражают характер перераспределения действующих напряжений в массиве в зависимости от интенсивности ведения крупномасштабных горных работ. Рассмотрены результаты пространственно-временного прогноза сейсмоопасной зоны на основе выявленного предвестника изменений значений комплексной оценки локальной зоны сейсмической активности и фактической реализации сильного сейсмического события на Юкспорском месторождении.

Abstract. The complex technique for seismic hazardous zones under conditions of rockburst-prone ore mines of the Khibiny massif has been developed; it is based on the combined use of different precursors of seismic emission flow. The obtained changes in number, configuration and location of the zones indicate character of the stress redistribution depending on the intensity of large-scale mining operation in rockbursts prone mines. The results of spatial and temporal prediction of the seismic hazardous zone basing on the identified precursor of changes of complex estimation values of the seismic activity local zone and virtual realization of the strong seismic event in the Yukspor deposit have been considered.

Ключевые слова: удароопасные рудные месторождения, техногенная сейсмичность, сейсмическая активность, сейсмоопасная зона, вероятностный прогноз

Key words: rockburst-prone ore mines, mining-induced seismicity, seismic activity, seismic hazardous zone, probabilistic prediction

1. Введение

Актуальной проблемой современной горнодобывающей промышленности (месторождений регионов России: апатит-нефелиновых и редкометалльных Кольского полуострова, бокситовых и железорудных Урала, железорудных Сибири и Рудного Алтая, медно-никелевых Сибири и Дальнего Востока, а также горнорудных провинций Австралии, ЮАР, Канады, США, Южной Америки и др.) является увеличение сейсмической активности на рудниках и, как результат, проявление сильных динамических событий в выработках (горных ударов и техногенных землетрясений).

Динамические явления, возникающие в массиве горных пород, носят случайный характер, что обусловлено множеством воздействующих на него факторов (космических, планетарных, антропогенных и т.д.). Поэтому результаты регистрации сейсмических событий как процесса, имеющего вероятностный характер, могут быть корректно интерпретированы только посредством статистической обработки данных, полученных в течение достаточно длительного интервала времени на значительной площади наблюдений. Существующие системы сейсмического мониторинга массива горных пород в пределах шахтных полей горнодобывающих предприятий постоянно развиваются и дополняются анализом баз данных максимально большего количества параметров, отражающих изменения его напряженно-деформированного состояния. Для повышения безопасности крупномасштабных горных работ в удароопасных высоконапряженных скальных массивах необходимо также совершенствовать методы вероятностного прогноза динамических проявлений горного давления.

Геодинамическая ситуация на рудниках, разрабатывающих удароопасные апатит-нефелиновые месторождения Хибинского массива Кольского полуострова, характеризуется значительным ростом общего количества горных ударов и техногенных землетрясений за последние 30 лет. Данная реакция массива горных пород обусловлена расширением фронтов работ при отработке стыковочных зон между соседними рудниками и формированием единой зоны взаимного влияния, объединяющей их шахтные поля. В таких условиях осуществление вероятностного прогноза геодинамической ситуации (по данным непрерывной регистрации сейсмических событий) возможно на основе ежедневного всестороннего

анализа пространственно-временных изменений параметров потока сейсмической эмиссии в геомеханическом пространстве рудников. Целью прогноза является выделение зон потенциальной сейсмической опасности с учетом фактора времени, т.е. участков массива горных пород в пределах шахтного поля или месторождения, в которых высока вероятность реализации сильного сейсмического события, являющегося причиной частичного или полного разрушения горных выработок, расположенных в этих зонах. В горной практике именно такие зоны называются удароопасными.

2. Методика исследований и обсуждение результатов

Горным институтом КНЦ РАН разработана и совершенствуется методика вероятностного прогноза сейсмоопасных зон выбранного участка обрабатываемого месторождения как ретроспективно, так и в режиме реального времени на основе анализа данных непрерывной регистрации сейсмических событий.

Для автоматизации проведения анализа потока данных и осуществления вероятностного прогноза на основе данной методики разработана программная система *MIEPS (Mining-Induced Earthquakes Prediction System)* (Kozyrev et al., 2013; Fedotova, Zhuravleva, 2013; Козырев и др., 2012; Kozuyrev et al., 2012; Козырев и др., 2011а; Федотова, Журавлева, 2011; Козырев и др., 2011b; Мельников и др., 2010; Козырев и др., 2010; Федотова, Журавлева, 2009; Козырев и др., 2008).

Рассмотрим поэтапно методику проведения вероятностного прогноза сейсмоопасных зон на основе анализа баз данных зарегистрированных событий.

Первый этап – расчет значений используемых прогностических критериев, отражающих различные параметры потока сейсмической эмиссии. В настоящее время для оценки состояния массива горных пород применяются следующие критерии: изменение фрактального размера пространственного распределения сейсмических событий; *b*-value – изменение угла наклона графика повторяемости зарегистрированных событий; концентрационный; изменение средней длины трещин. В процессе совершенствования методики количество учитываемых прогностических критериев будет увеличиваться.

По результатам расчетов строятся пространственно-временные карты распределения значений критериев, а также графики изменения этих значений во времени для разных пространственных ячеек.

На данном этапе необходима адаптация разработанной методики к условиям обработки конкретного месторождения и возможностям сети сейсмического мониторинга, заключающаяся в установлении критических значений (диапазонов значений) каждого прогностического критерия. Критические значения одного и того же прогностического критерия для разных месторождений (участков одного месторождения) в зависимости от их геолого-структурных особенностей будут различны. Следует отметить, что точность определения значений отдельного критерия отражается на точности результатов последующего анализа.

В настоящее время проведена адаптация разработанных методики и программного обеспечения к условиям обработки удароопасных месторождений Хибинского массива, в процессе которой выбраны оптимальные параметры анализа данных, полученных в ходе сейсмических наблюдений:

- 1) расчеты значений каждого из прогностических критериев проводятся для пространственных ячеек размером 200×200 м;
- 2) перекрытие соседних ячеек составляет 75 % (т.е. сдвиг окна по оси равен 50 м);
- 3) вероятностный прогноз сильных сейсмических событий (10^6 - 10^8 Дж) проводится посредством анализа слабых сейсмических событий (10^3 - 10^5 Дж).

Второй этап – проведение комплексной оценки рассчитанных значений прогностических критериев, которые приводятся (в интервале от 0 до 1) к сравнимому виду:

$$X'_i = (X_i - \min(X)) / (\max(X) - \min(X)), \quad (1)$$

где X – множество всех значений прогностического критерия; X_i – начальное значение прогностического критерия; X'_i – измененное значение прогностического критерия; $i = [1..m]$, здесь m – количество значений прогностического критерия (количество значений каждого из критериев, рассчитанных для определенной выборки событий, всегда одинаково).

Результирующее значение комплексной оценки X_i'' для конкретной ячейки определяется по формуле

$$X_i'' = 1 / N \cdot \sum_{j=1}^N (X_{ij}'), \quad (2)$$

где X_{ij}' – значение прогностического критерия, рассчитанное по формуле (1); N – количество прогностических критериев; $j = [1..N]$.

Для выбранного периода наблюдений на основе полученных значений комплексной оценки строятся карты сейсмически активных зон и определяется тип их вероятного развития. Классификация сейсмически активных зон обрабатываемых удароопасных Кукисвумчоррского и Юкспорского месторождений Хибинского массива, построенная исходя из установленных диапазонов значений комплексной оценки, представлена в таблице.

Таблица. Диапазоны значений комплексной оценки и типы сейсмически активных зон

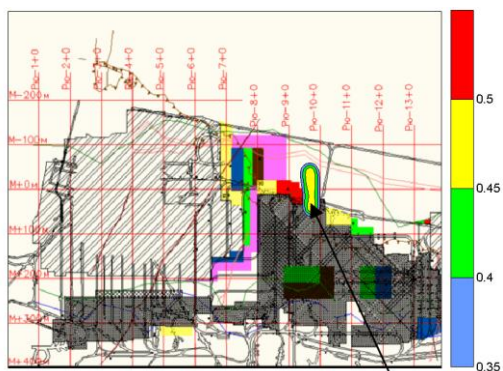
Значение комплексной оценки	Тип зоны
0.50 и более	Растущая
От 0.45 до 0.50	Пульсирующая
От 0.40 до 0.45	Устойчивая
Менее 0.40	Затухающая

Третий этап – осуществление вероятностного прогноза сейсмоопасной зоны в пределах выделенной зоны сейсмической активности на основании расчетов вероятности возникновения в ней сильного сейсмического события (серии событий). При этом учитывается, что в растущей зоне сейсмической активности высока вероятность реализации отдельного сильного сейсмического события или серии событий (т.е. высока вероятность возникновения зоны сейсмической опасности); в пульсирующей – возможна реализация сильного сейсмического события, а также возможен переход зоны в устойчивое состояние; в устойчивой – маловероятна реализация сильного сейсмического события; затухающей – практически отсутствует реализация сильных сейсмических событий.

Следует отметить, что при получении высоких значений комплексной оценки и вероятности возникновения сильного сейсмического события вблизи контура горных выработок, т.е. при выделении вероятной зоны сейсмической опасности, необходимо проводить анализ всей имеющейся информации о горно-технологической обстановке данного участка шахтного поля. Это связано с тем, что в результате реализации такого события (горного удара регионального или локального происхождения) может произойти частичное или полное разрушение выработок, попадающих в выделенную зону. Анализ данных численного моделирования, измерений, проведенных с помощью локальных методов, а также данных визуального обследования выработок в пределах выделенной зоны сейсмической опасности позволяет локализовать вероятные зоны удароопасности и заблаговременно начать проведение мероприятий по предупреждению и минимизации последствий данных событий.

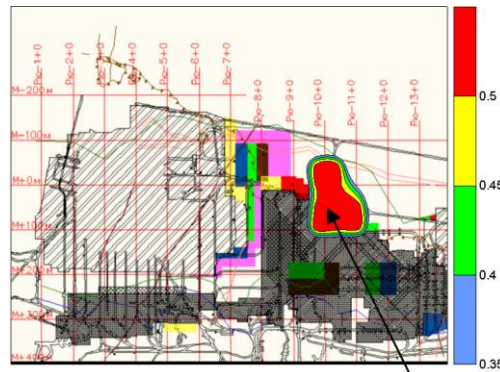
Так, проведенный по данной методике с помощью разработанной программной системы анализ изменений значений комплексной оценки сейсмической активности Хибинского массива позволил установить стадии подготовки и реализации обрушения подработанных пород висячего бока на участке горизонта +410 м Юкспорского крыла Объединенного Кировского рудника ОАО "Апатит" (на рисунках, представленных ниже, штриховкой серого цвета отмечены отработанные блоки, прямоугольниками различных цветов – обрабатываемые и планируемые к отработке блоки, звездочкой – место реализации события):

- а) первая стадия – формирование локальной зоны сейсмической активности.



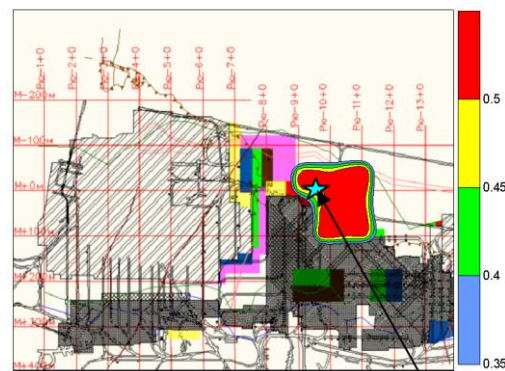
20.05.2012 в 8:00:00 установлен устойчивый тип зоны;

- б) вторая стадия – формирование сейсмоопасной зоны.



21.05.2012 в 8:00:00 установлен растущий тип зоны;

в) третья стадия – реализация сильного сейсмического события.



24.05.2012 в 8:00:00 установлено достижение критического уровня.

Многолетние техногенные воздействия и обводненность пород в период интенсивного снеготаяния являются факторами, которые зачастую приводят к подвижке блоков различного ранга по ранее ослабленным тектоническим нарушениям. В особенности это характерно для пород висячего бока под кромкой обрушения отрабатываемых высоконапряженных Хибинских месторождений. Так, сейсмическое воздействие взрывания вееров скважин 23.05.2012 г. на участке горизонта +410 м при интенсивной обводненности массива спровоцировало прорастание магистральной трещины, сопровождающееся сейсмическими событиями с энергией до $2 \cdot 10^7$ Дж, что и привело к самообрушению пород висячего бока 24.05.2012 г. Проведенный анализ полученных результатов также показал, что в мае 2012 г. наблюдалось почти двукратное увеличение числа сейсмических событий по сравнению с предыдущими месяцами.

Таким образом, по результатам проведенного анализа был выявлен предвестник возникновения серии сейсмических событий при ведении горных работ, заключающийся в значительном росте значений комплексной оценки (от 0.5 до 0.55) ряда прогностических критериев и в увеличении площади сейсмоактивной зоны более чем в 1.5 раза в течение суток за три дня до основного события.

3. Заключение

Представленные результаты расчетов получены с помощью программной системы *MIEPS*. Время, затрачиваемое на стандартные расчеты для одной выборки, составляет менее минуты. Таким образом, применение разработанной программной системы позволяет проводить оперативную оценку изменений сейсмического режима массива горных пород в процессе отработки месторождения.

Разработанная методика и программное обеспечение могут применяться для анализа баз данных непрерывной регистрации сейсмических событий в различных удароопасных зонах скальных массивов горных пород после адаптации их к конкретным условиям месторождений.

Исследования проводились при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант №12-05-00507.

Литература

- Fedotova Iu.V., Zhuravleva O.G.** Seismic observations data processing in mining enterprise. *Proceeding of the 23rd International Mining Congress of Turkey. April 16-19, 2013. Antalya, Turkey. Ed. Ilkay Celik & Mehtar Kilic. Publ. TMMOD Maden Muhendisleri Odasi Selanic Cad. 19/14 Kizilay-Ankara*, p. 2105-2110, 2013.
- Kozyrev A.A., Fedotova Iu.V., Zhuravleva O.G.** Some results of prediction of mining-induced seismicity manifestations at the Khibiny apatite mines. *II Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium SHIRMS, South Africa. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, p. 451-456, 2012.
- Kozyrev A.A., Fedotova Iu.V., Zhuravleva O.G.** Some results on mining-induced seismicity prediction in the Khibiny apatite mines. *Proceeding of the 8th International Symposium Rockbursts and Seismicity in Mines. Ed. A. and D. Malovichko. Geophysical Survey of RAS, Mining Institute UB RAS. Moscow-Perm*, p. 313-317, 2013.
- Козырев А.А., Панин В.И., Каспарьян Э.В., Савченко С.Н., Федотова Ю.В., Рыбин В.В., Журавлева О.Г.** Определение закономерностей эволюции напряженно-деформированного состояния геологической среды в горнотехнических системах для повышения безопасности горных работ. *Комплексное освоение недр Земли: новые методы разработки и обогащения многокомпонентных руд и углей в условиях кризиса. Под науч. ред. К.Н. Трубецкого, М., Московский издательский дом, 275 с., 2011.*
- Козырев А.А., Федотова Ю.В., Виноградов А.Н., Виноградов Ю.А., Каган М.М., Журавлева О.Г., Панин В.И.** Закономерности самоорганизации техногенного сейсмического процесса в горнотехнических системах. *Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия. Под ред. Опарина В.Н. и др., Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т горного дела (и др.); Новосибирск, СО РАН, 632 с., 2012. (Раздел 1. Деструкция и процессы самоорганизации геологической среды в горно-технических системах Хибин. Гл. 3, с. 86-117).*
- Козырев А.А., Федотова Ю.В., Журавлева О.Г.** Комплексный прогноз изменений сейсмического режима на Хибинских апатитовых рудниках. *Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Мат. VI Междун. сейсмологической школы. Обнинск, ГС РАН, с. 170-174, 2011.*
- Козырев А.А., Федотова Ю.В., Журавлева О.Г.** Методические положения и некоторые результаты прогноза тектонических землетрясений на рудниках Кольского полуострова. *Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Сб. науч. трудов. Новосибирск, ИГД СО РАН, с. 502-506, 2008.*
- Козырев А.А., Федотова Ю.В., Журавлева О.Г., Звонарь А.Ю., Запорожец В.Ю.** Выделение зон повышенной сейсмоопасности по комплексу прогностических критериев. *Горный журнал, № 9, с. 44-47, 2010.*
- Мельников Н.Н., Козырев А.А., Федотова Ю.В., Журавлева О.Г.** Оценка сейсмоопасности массива пород при техногенном воздействии горных работ по комплексу прогностических критериев. *Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосферы. Новосибирск, с. 15-19, 2010.*
- Федотова Ю.В., Журавлева О.Г.** Выявление зон повышенной сейсмоактивности массива горных пород и их взаимосвязи с горно-геологическими условиями. *Проблемы и тенденции рационального и безопасного освоения георесурсов: сб. докладов Всерос. науч.-техн. конф. с междун. участием, посвященной 50-летию Горного института КНЦ РАН. Апатиты, СПб., с. 380-385, 2011.*
- Федотова Ю.В., Журавлева О.Г.** Комплексный критерий оценки удароопасности пород по параметрам сейсмической эмиссии. *Комплексные геолого-геофизические модели древних щитов. Труды Всерос. (с междун. участием) науч. конф. Апатиты, Геологический институт КНЦ РАН, с. 271-274, 2009.*

References

- Fedotova Iu.V., Zhuravleva O.G.** Seismic observations data processing in mining enterprise. *Proceeding of the 23rd International Mining Congress of Turkey. April 16-19, 2013. Antalya, Turkey. Ed. Ilkay Celik & Mehtar Kilic. Publ. TMMOD Maden Muhendisleri Odasi Selanic Cad. 19/14 Kizilay-Ankara*, p. 2105-2110, 2013.
- Kozyrev A.A., Fedotova Iu.V., Zhuravleva O.G.** Some results of prediction of mining-induced seismicity manifestations at the Khibiny apatite mines. *II Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium SHIRMS, South Africa. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, p. 451-456, 2012.
- Kozyrev A.A., Fedotova Iu.V., Zhuravleva O.G.** Some results on mining-induced seismicity prediction in the Khibiny apatite mines. *Proceeding of the 8th International Symposium Rockbursts and Seismicity in*

Mines. Ed. A. and D. Malovichko. Geophysical Survey of RAS, Mining Institute UB RAS. Moscow-Perm, p. 313-317, 2013.

- Kozyrev A.A., Panin V.I., Kasparyan E.V., Savchenko S.N., Fedotova Yu.V., Rybin V.V., Zhuravleva O.G.** Opredelenie zakonomernostey evolyutsii napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya geologicheskoy sredy v gorno-tehnicheskikh sistemah dlya povysheniya bezopasnosti gornyh rabot [Defining patterns of evolution of the stress-strain state of the geological environment in mining systems to improve mine safety]. Kompleksnoe osvoenie nedr Zemli: novyye metody razrabotki i obogashcheniya mnogokomponentnykh rud i ugley v usloviyah krizisa. Pod nauch. red. K.N. Trubetskogo, M., OOO "Moskovskiy izdatelskiy dom", 275 p., 2011.
- Kozyrev A.A., Fedotova Yu.V., Vinogradov A.N., Vinogradov Yu.A., Kagan M.M., Zhuravleva O.G., Panin V.I.** Zakonomernosti samoorganizatsii tehnogenogo seysmicheskogo protsessa v gornotehnicheskikh sistemah. Destruktsiya zemnoy koryi i protsessyi samoorganizatsii v oblastyah silnogo tehnogenogo vozdeystviya [Regularities of self-organisation of technogenic seismic process in mining systems]. Pod red. Oparina V.N. i dr. Ros. akad. nauk, Sib. otd-nie, In-t gornogo dela (i dr.); Novosibirsk, SO RAN, 632 p., 2012. (Razdel 1. Destruktsiya i protsessyi samoorganizatsii geologicheskoy sredy v gorno-tehnicheskikh sistemah Hibin. Gl. 3, p. 86-117).
- Kozyrev A.A., Fedotova Yu.V., Zhuravleva O.G.** Kompleksnyy prognoz izmeneniy seysmicheskogo rezhima na Hibinskih apatitovykh rudnikah. Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seysmologicheskikh dannykh [Comprehensive forecast of changes of seismic regime in the Khibiny apatite mines]. Mat. VI Mezhdun. seysmologicheskoy shkoly. Obninsk, GS RAN, p. 170-174, 2011.
- Kozyrev A.A., Fedotova Yu.V., Zhuravleva O.G.** Metodicheskie polozheniya i nekotorye rezultaty prognoza tektonicheskikh zemletryaseniy na rudnikah Kolskogo poluoostrova [Methodics and some results of tectonic earthquakes forecast in the mines of the Kola Peninsula]. Geodinamika i napryazhonnoe sostoyanie nedr Zemli. Sb. nauch. trudov. Novosibirsk, IGD SO RAN, p. 502-506, 2008.
- Kozyrev A.A., Fedotova Yu.V., Zhuravleva O.G., Zvonar A.Yu., Zaporozhets V.Yu.** Vydelenie zon povyshennoy seysmoopasnosti po kompleksu prognosticheskikh kriteriev [Defining of zones of high seismic hazard for complex prognostic criteria]. Gornyy zhurnal, N 9, p. 44-47, 2010.
- Melnikov N.N., Kozyrev A.A., Fedotova Yu.V., Zhuravleva O.G.** Otsenka seysmoopasnosti massiva porod pri tehnogenom vozdeystvii gornyykh rabot po kompleksu prognosticheskikh kriteriev [Seismic hazard assessment of the rock massif at technogenic impact on the range of prognostic criteria]. Fundamentalnye problemy formirovaniya tehnogennoy geosfery. Novosibirsk, p. 15-19, 2010.
- Fedotova Yu.V., Zhuravleva O.G.** Vviyavlenie zon povyshennoy seysmoaktivnosti massiva gornyykh porod i ih vzaimosvyazi s gorno-geologicheskimi usloviyami [Identification of zones of high seismic activity of the rock mass and its relationship to geological conditions]. Problemy i tendentsii ratsionalnogo i bezopasnogo osvoeniya georesurov: sb. dokladov Vseros. nauch.-tehn. konf. s mezhdun. uchastiem, posvyashchennoy 50-letiyu Gornogo instituta KNTs RAN. Apatity, SPb., p. 380-385, 2011.
- Fedotova Yu.V., Zhuravleva O.G.** Kompleksnyy kriteriy otsenki udaroopasnosti porod po parametram seysmicheskoy emissii [Comprehensive criterion of evaluation of rockburst hazardous rocks according to parameters of seismic emission]. Kompleksnyye geologo-geofizicheskie modeli drevnykh shchitov. Trudy Vseros. (s mezhdun. uchastiem) nauch. konf. Apatity, Geologicheskyy institut KNTs RAN, p. 271-274, 2009.

Информация об авторах

Козырев Анатолий Александрович – Горный институт (ГоИ) КНЦ РАН, д-р техн. наук, профессор, зам. директора института, e-mail: kozar@goi.kolasc.net.ru

Kozyrev A.A. – Mining Institute KSC RAS, Deputy Director (Research), Dr of Tech. Sci., Professor, e-mail: kozar@goi.kolasc.net.ru

Федотова Юлия Викторовна – Горный институт (ГоИ) КНЦ РАН, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, e-mail: fjulia@mail.ru

Fedotova Yu.V. – Mining Institute KSC RAS, Cand. of Tech. Sci., Senior Researcher, e-mail: fjulia@mail.ru

Журавлева Ольга Геннадьевна – Горный институт (ГоИ) КНЦ РАН, канд. техн. наук, науч. сотрудник, e-mail: olja-zh@yandex.ru

Zhuravleva O.G. – Mining Institute KSC RAS, Cand. of Tech. Sci., Researcher, e-mail: olja-zh@yandex.ru