НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 550.3: 622.02 (075.8)

К МЕТОДИКЕ ПРОГНОЗА ГОРНЫХ УДАРОВ НА РУДНИКАХ

Дудко Константин Львович,
старший преподаватель, e-mail: constantin.dudko@yandex.ru
Шиканов Алексей Иванович,
кандидат техн. наук, доцент, e-mail: shai.tigm@mail.ru

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

Аннотация

Актуальность работы. *С увеличением глубины разработки Таштагольского месторождения возросла опасность возникновения горных ударов. С 300 м появилось стреляние горных пород, а с глубины 600 м стали возникать горные удары, микроудары и толчки; до 760 м количество динамических явлений возросло. Действующая на сегодня методика прогноза горных ударов имеет низкую достоверность.*

Цель работы: *Разработка рекомендаций по совершенствованию методики прогноза горных ударов на железорудных месторождениях.*

Методы исследования: *Методы математического моделирования – для количественной оценки степени влияния контакта породных слоев на распределение КУЭС в массиве.*

Методы теории аппроксимации – для оценки адекватности полученных теоретических зависимостей по экспериментальным данным путем их сопоставления.

Результаты: *Рассмотрено влияние вертикального плоского контакта двух сред с удельными электросопротивлениями на параметры поля точечного источника, а также рассмотрена модель неоднородной среды, представляющей полупространство из нескольких крутопадающих пластов с плоскими границами. Разработаны рекомендации по совершенствованию прогноза горных ударов на рудниках с использованием электропрофилирования.*

Ключевые слова: *электропрофилирование, электросопротивление, удароопасность, однородный массив, рудник.*

Железорудные месторождения Горной Шории и Хакасии разрабатываются на больших глубинах в условиях действия высоких тектонических напряжений и нарушенности массива горных пород. Руды и породы прочные, хрупко разрушаются под нагрузкой, способны накапливать значительную упругую энергию деформаций; около 90 % пород удароопасны. Развитие горных работ связано с ростом объемов проведения капитальных, подготовительных и очистных выработок, которые расположены как в шахтном поле, так и в лежачем боку месторождения, имеют большой удельный вес и их длина на отдельных рудниках изменяется от сотен до тысяч метров [1].

По силе и характеру динамические проявления горного давления подразделяются на горно-тектонические удары и собственно горные удары (далее - горные удары), микроудары, толчки, стреляния. К внешним признакам динамического проявления горного давления относятся интенсивное заколообразование и шелушение пород (руд) на контуре горных выработок [2].

Наиболее крупные проявления горного давления в динамической форме отмечены на руднике при отработке запасов в этаже (-140) ÷ (-70) м в начале 80-х годов, когда в результате толчков и горных ударов разрушались горные выработки. Массовые взрывы по обрушению технологических блоков вызывали толчки и горные удары с разрушением крепи выработок, деформированием железнодорожных путей и повреждением коммуникаций. Интенсивность динамических явлений зависела от расположения блока относительно геологического нарушения, массы заряда ВВ и размеров взрываемого уступа. Чем меньше величина заряда ВВ при массовом взрыве, тем меньше площадь и объем разрушения в результате спровоцированного им горного удара. С 1982 г. горные удары характеризуются региональными разрушениями в шахтах и не всегда были связаны с технологическими операциями. Кроме того, опасность для трудящихся в шахте представляли толчки, происходящие вне шахтного поля, сейсмическое сотрясение от которых приводило к падению отдельных кусков горных пород. Причиной таких толчков считались подвижки массива по тектоническим нарушениям. В последние годы общее число толчков и их энергия значительно возросли,

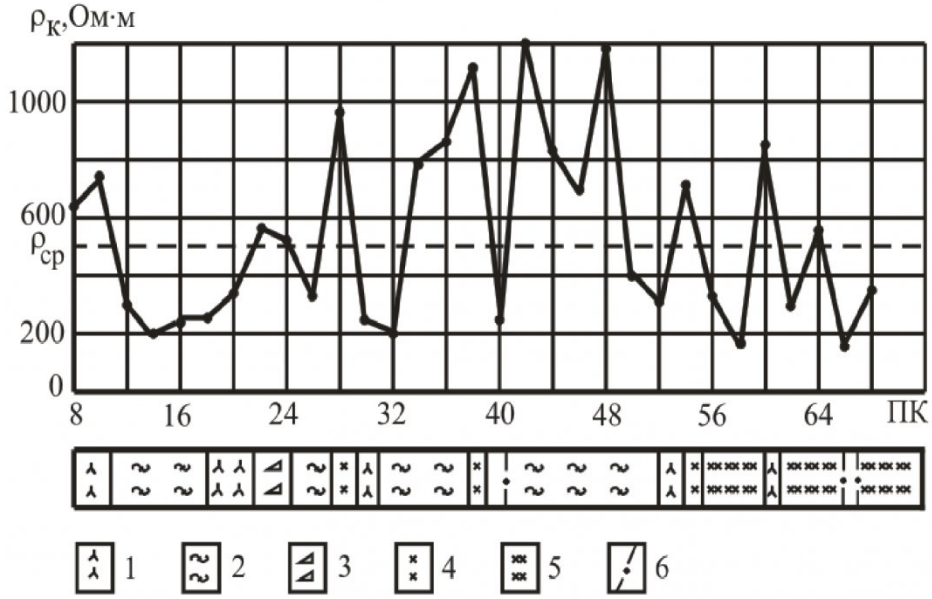

Рис. 1. Изменение КУЭС по профилю порожнякового квершлага 1 – сиенит; 2 – сланцы; 3 – дайка полевого шпата; 4 – диоритовая дайка; 5 – скарны; 6 – дизъюнктивные нарушения

при этом в 1987 г. зарегистрированы 1 горный удар, 2 микроудара, 228 толчков и стреляний. Всего на руднике зарегистрировано 18 горных ударов (в том числе 6 ударов горно-тектонического типа), 11 из них в последние годы, и 49 микроударов [3].

При рассмотрении методики прогноза горных ударов на рудниках с помощью подземного электропрофилирования одной из возможных причин снижения достоверности прогноза данным методом было указано использование в критерии удароопасности среднего по всему профилю значения электросопротивления [4].При этом длина измерительных профилей в выработках (руддворы, квершлаги, полевые штреки) составляет 500–700 метров.

Как отмечено в работе [5], железорудные месторождения Сибири сложены крутопадающими линзообразными рудными телами и вмещающими толщами – массивами сиенита, скарна, сланцев, порфиритов и др. Массивы характеризуются дизъюнктивными тектоническими нарушениями и высокой трещиноватостью.

Применяемое на рудниках для прогноза горных ударов электропрофилирование проводится в выработках, ориентированных горизонтально. При измерениях с контура горных выработок линия профиля может пересекать границы различных по составу слоев пород, плоскости нарушений и крупных трещин. Поэтому источник поля, линия наблюдений и поверхности раздела могут занимать различные положения в пространстве.

На рис. 1 приведен геологический разрез вдоль профиля электрометрических измерений в порожняковом квершлаге Таштагольского рудника. Следует отметить, что участок профиля между П26 и П48 является зоной повышенной трещиноватости.

Значения кажущегося электросопротивления (КУЭС) на участках выработки значительно отличаются как друг от друга, так и от среднего КУЭС ρ_{cp} по профилю (рис. 1). Такой разброс может быть обусловлен различными причинами, в том числе и наличием на профиле породных блоков с различным геологическим строением.

В самом деле, как рассмотрено в работе [6], влияние вертикального плоского контакта двух сред с удельными электросопротивлениями (УЭС) ρ_1 и ρ_2 на параметры поля точечного источника весьма существенно. По полученным в этой работе формулам проведены расчеты КУЭС вдоль профиля. Результаты некоторых расчетов представлены на рис. 2 и 3. Из представленных результатов видно, что контакт двух сред действительно существенно влияет на распределение КУЭС по профилю измерений. Отражение тока от границ вносит значительный вклад в величины КУЭС, отклоняя их значения от истинного УЭС тем больше, чем больше определяемый значениями ρ_1 и ρ_2 коэффициент отражения тока.

В работе [6] также рассмотрена модель неоднородной среды, представляющей полупространство из нескольких крутопадающих пластов с плоскими границами.

Если расстояние между границами превышает размеры измерительной установки, то задача сводится к выделению одиночных контактов. Иначе необходимо учитывать экранирующее влияние соседних пластов.

Для случая, когда крайние пласты имеют неограниченную мощность, получены следующие выражения для потенциальных функций U_i и градиентов потенциала $\partial U_i / \partial z$ в каждом слое:

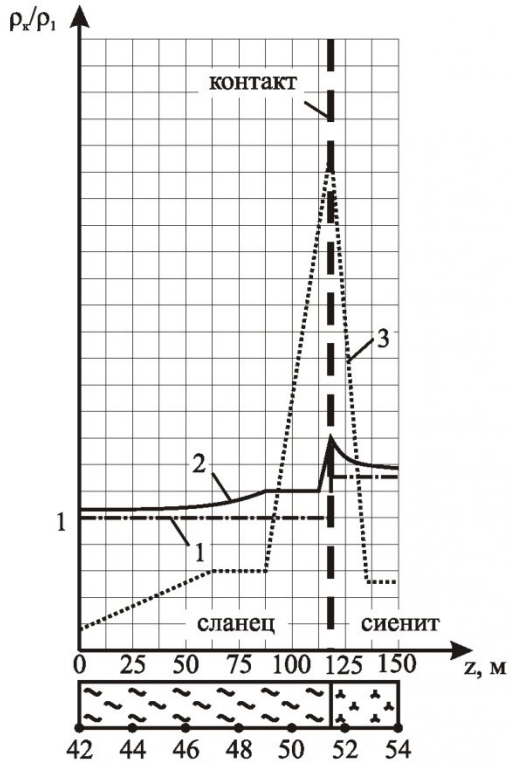

Рис. 2. Распределение КУЭС над контактом сланцев и сиенита: 1 – модель удельных сопротивлений (ρ_2/ρ_1); 2 – теоретический график КУЭС; 3 – измеренные КУЭС; 42-54 – номер пикета

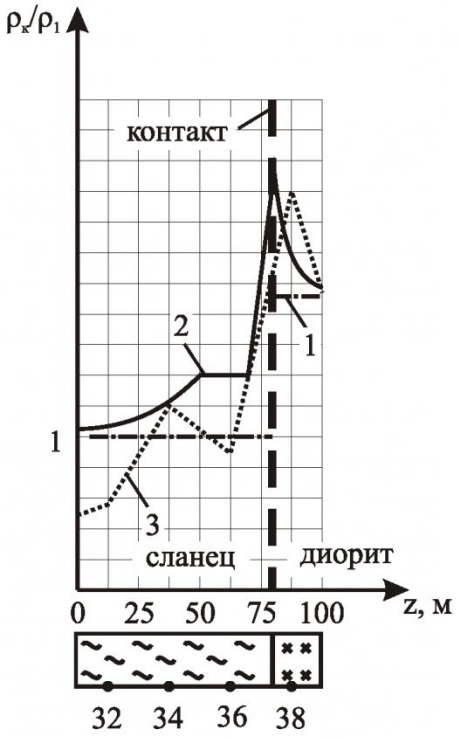

Рис. 3. Распределение КУЭС над контактом сланцев и диорита: 1 – модель удельных сопротивлений (ρ_2/ρ_1); 2 – теоретический график КУЭС; 3 – измеренные КУЭС; 32-38 – номер пикета

$$U_i(r,z)=\int_0^\infty (a_i e^{-mz}+b_i e^{mz})I_0(mr)dm \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial z}=-\int_0^\infty (a_i m e^{-mz}+b_i m e^{mz})I_0(mr)dm \quad (2)$$

где $I_0(mr)$ - функция Бесселя нулевого порядка первого рода; m – переменная интегрирования, имеющая смысл частоты повторяемости цилиндрической функции на единицу длины; a_i, b_i - постоянные коэффициенты $(i=1,2,...5)$.

В виду неограниченности первого и пятого слоев коэффициенты $a_1=I\rho_1/4\pi$ и $b_5=0$. Остальные коэффициенты можно найти с помощью граничных условий, предусматривающих равенство потенциалов и нормальных составляющих плотности тока на границах раздела сред.

Решив систему уравнений для выбранного варианта и определив соответствующие коэффициенты a_i, b_i, получаем выражения для вычисления потенциалов и их градиентов во всех пластах. Полученные выражения представляют собой несобственные интегралы, содержащие функции Бесселя: Применительно к геоэлектрике существует несколько алгоритмов вычисления таких интегралов [7].

При их вычислении получается функциональный ряд, коэффициенты которого зависят от геометрических и электромагнитных параметров модели. Эти коэффициенты умножаются на собственные функции, зависящие от величины разноса. Применительно к нашей задаче (небольшие по сравнению с электроразведочными работами разносы электродов) целесообразно использовать метод расчета потенциала точечного источника тока в многослойной плоскопараллельной модели среды, предложенный в работе [8].

Аппроксимацию подынтегральной функции $\Phi=ae^{-mz}+be^{mz}$ проводят экспоненциальным многочленом по методу Прони, что позволяет произвести взятие несобственного интеграла, используя тождество Вебера-Липшица (аналогичный подход аппроксимации экспонентами – алгоритм Андерсона – используется в электроразведке [9]):

$$\Phi=\int_0^\infty \Phi(m,z_0,z)I_0(mr)dm=$$

$$=\int_0^\infty I_0(mr)\sum_{s=1}^N A_s e^{-mB_s}dm\cong\sum_{s=1}^N\frac{A_s}{\sqrt{r^2+B_s^2}} \quad (3)$$

где N – старшая степень аппроксимирующего многочлена, соответствующая количеству слоев исследуемой модели среды; A_s, B_s – коэффициен-

ты аппроксимации; $r=\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}$; x, y, z – координаты расчетной точки; x_0, y_0, z_0 – координаты источника тока.

Для расчета коэффициентов аппроксимации A_s, B_s в [8] определяют корни разностного уравнения через обратную матрицу тёплицевой структуры, формируют полином из полученных коэффициентов, определяют его экспоненциальные корни $p=e^{-B_s}$ и решают систему линейных алгебраических уравнений, сформированной корнями полинома в виде матрицы Вандермонда [10] относительно коэффициентов A_s. При этом получаемые коэффициенты B_s не знакопеременны (основное условие использования тождества Вебера-Липшица).

Рассмотренный выше алгоритм вычисления значений функции Ф для n – слойной модели среды был реализован на языке *JavaScript* с использованием программ, приведенных в работе [11]. Результаты расчетов приведены на рис. 4,5.

Как отмечает автор предложенных моделей, при проведении расчетов необходимо учитывать также, в каком слое в данный момент находится источник тока. Поэтому при проведении электропрофилирования постоянным током важно соблюдать полярность питающих электродов А и В при каждом повторном измерении [12].

Результаты расчетов и сравнение их с экспериментальными данными (рис. 2-5) показывают, что геологическое строение электроразведочного профиля существенно отражается на характере распределения КУЭС вдоль него. Это необходимо учитывать при обработке результатов измерений для оценки напряженного состояния массива [13].

Таким образом, при проведении прогноза горных ударов на рудниках с использованием электропрофилирования в существующей действующей методике прогноза [14,15] необходимо учесть следующее:

1. При проведении измерительного профиля необходимо выделять ненарушенные однородные участки выработки. После проведения измерений на них следует определять среднее значение КУЭС $\rho_{ср(уч)}$.

2. Электрометрический коэффициент для ме-

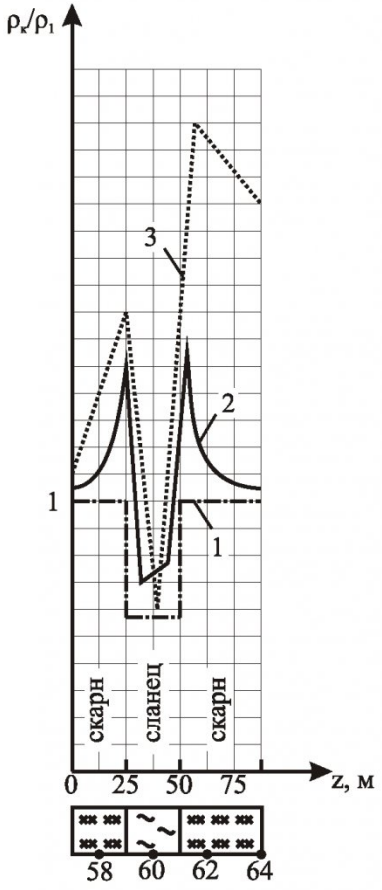

Рис. 4. Распределение КУЭС над пластом из сланца 1 – модель удельных сопротивлений (ρ_2/ρ_1); 2 – теоретический график КУЭС; 3 – измеренные значения КУЭС; 58-64 – номер пикета

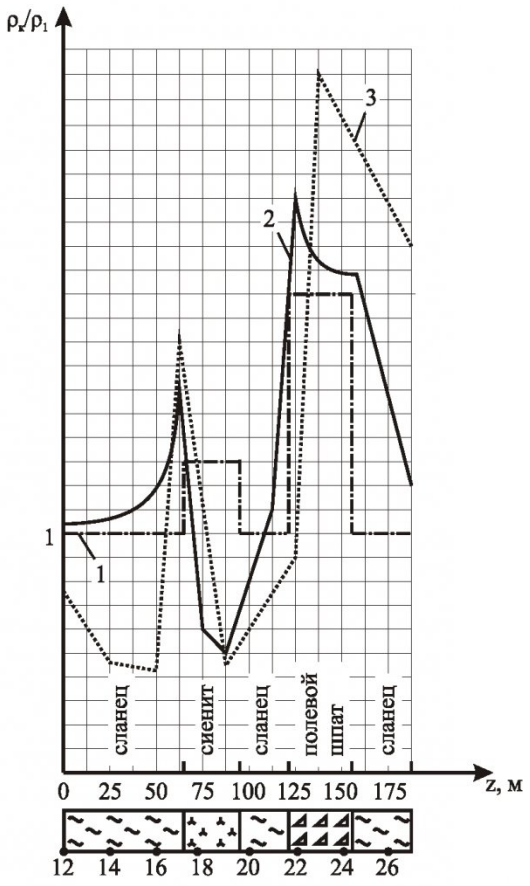

Рис. 5. Распределение КУЭС над сближенными пластами из сиенита и полевого шпата 1 – модель удельных сопротивлений (ρ_2/ρ_1); 2 – теоретический график КУЭС; 3 – измеренные значения КУЭС; 12-26 – номер пикета

тода регионального прогноза горных ударов следует определять по формуле

$$K_{\rho} = \rho_{ср(уч)} / \rho_{н},$$

где $\rho_{ср(уч)}$ – КУЭС ненарушенного однородного участка выработки; $\rho_{н}$ – КУЭС при неудароопасном состоянии массива.

3. При всех текущих и повторных измерениях не допускать изменений полярности питающих электродов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Еременко, А. А.* Горно-геологические и геомеханические условия разработки железорудных месторождений в Алтае-Саянской складчатой области / А. А. Еременко, В. А. Еременко, А. П. Гайдин // РАН, СО, Ин-т горн. дела, – Новосибирск, 2009. – 224

2. Инструкция по безопасному ведению горных работ на рудных и нерудных месторождениях, объектах строительства подземных сооружений, склонных и опасных по горным ударам : РД 06-329-99 : утв. постановлением Госгортехнадзора России 24.11.1999 / А. М. Ильин (пред.) [и др.] // Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности, – Москва, 2010. – 84с.

3. Еременко, А. А. Проведение и крепление горных выработок в удароопасных зонах железорудных месторождений / А. А. Еременко, А. И. Федоренко, А. И. Копытов // РАН, Сиб. отд-ние, Ин-т горн. дела, – Новосибирск, 2008. – 236 с.

4. *Дудко, К. Л.* Оценка удароопасности массива по результатам подземного электропрофилирования на Таштагольском руднике / К. Л. Дудко, А. И. Шиканов // Вестник Кузбасского государственного технического университета, 2013. №1. С. 10-12.

5. *Курленя, М. В.* Геомеханические проблемы разработки железорудных месторождений Сибири / М. В. Курленя, А. А. Еременко, Б. В. Шрепп – Новосибирск: Наука, 2001. – 184 с.

6. *Матвеев, Б. К.* Электроразведка. Недра. – Москва, 1990. – 368 с.

7. *Юдин, М. Н.* Математические модели геоэлектрики. Часть I. Слоистые модели сред / М. Н. Юдин, В. М. Юдин // Рос. гос. геолого – разв. унив. – Москва, 2007. – 155 с.

8. *Зубов, К. Н.* Метод расчета заземляющих устройств произвольной конфигурации в неоднородных грунтах / К. Н. Зубков, А. Е. Немировский // Вести высш. учеб. Заведений Черноземья №2. – Липецк, 2010. – 21-26 с.

9. *Хемминг, Р. В.* Численные методы.– М: Наука, 1968. – 400 с.

10. *Корн, Г. А.* Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. А. Корн, Т. М. Корн – М: Наука., 1974. – 832 с.

11. *Кафтанова, Ю.В.* Специальные функции математической физики. Часть I. Новое слово. – Харьков, 2009. – 178 с.

12. *Матвеев, Б. К.* Электроразведка при поисках месторождений полезных ископаемых. Недра. – Москва, 1982. – 375 с.

13. *Дудко, К. Л.* Влияние геологического строения электропрофиля на кажущееся электросопротивление пород / К. Л. Дудко, А. И. Шиканов // Вестник Кузбасского государственного технического университета, 2015. №1. – С. 11-13.

14. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях Горной Шории, склонных и опасных по горным ударам // Изд-во ВостНИГРИ. – Новокузнецк: 2001. – 55 с.

15. *Егоров, П. В.,* Справочное пособие для служб прогноза и предотвращения горных ударов на шахтах и рудниках / П. В. Егоров, В. В. Иванов, В. В. Дырдин, В. А. Коваленко, М. Ф. Петухов, Б. В. Красильников, В. А. Квочин, В. К. Клименко, А. А. Ренев, В. С. Лудзиш, А. Н.Фокин – М: Недра, 1995. - 240 с.

Поступило в редакцию 15.05.2015

TO THE METHOD OF PREDICTION OF ROCK BURSTS IN MINES

Dudko Konstantin L.,
Senior Lecturer, e-mail: constantin.dudko@yandex.ru
Shikanov Aleksey I.,
C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail:shai.tgm@mail.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

Abstract

The urgency of the discussed issue. With increasing depth the development of the Tashtagol Deposit has increased the risk of rock bursts. With 300 m appeared shooting rocks, and with a depth of 600 m began to emerge rockbursts, micro impacts and shocks; up to 760 m number dynamic phenomena has increased. Acting at present the method of prediction of rock bursts has low reliability.

The main aim of the study: Development of recommendations for improving methods of prediction of rock bursts in iron ore deposits.

The methods used in the study: Methods of mathematical modeling is to quantify the degree of influence of the contact of the rock layers in raspredelenie CUES in the array. Methods of approximation theory is to assess the adequacy of the theoretical curves to the experimental data by comparison.

The results: The influence of the vertical flat contact of two media with specific elektrosoprotivleniya on the options field of a point source, as well as the model of an inhomogeneous medium, representing the half-space of several steep seams with flat borders. Developed recommendations for improving the prediction of rock bursts in mines using elektroproprivod.

Key words: electric profiling, resistivity, rock burst, homogeneous array, the mine.

REFERENCES

1. Eremenko A. A., Eremenko V. A., Gaydin A. P. Gorno-geologicheskie i geomekhaniche-skie usloviya razrabotki zhelezorudnykh mestorozhdeniy v Altae-Sayanskoy skladchatoy oblasti. Novosibirsk, RAN, SO, In-t gorn. dela, 2009. 224 P.

2. Instruktsiya po bezopasnomu vedeniyu gornykh rabot na rudnykh i nerudnykh mestoro-zhdeniyakh, obektakh stroitelstva podzemnykh sooruzheniy, sklonnykh i opasnykh po gor-nym udaram: RD 06-329-99: utv. postanovleniem Gosgortekhnadzora Rossii 24.11.1999. Moskva, Nauchno-tekhnicheskiy tsentr issledovaniy problem promyshlennoy bezopasnosti, 2010. 84 P.

3. Eremenko A. A., Fedorenko A. I., Kopytov A. I. Provedenie i kreplenie gornykh vyrabotok v udaroopasnykh zonakh zhelezorudnykh mestorozhdeniy. Novosibirsk, RAN, Sib. otd-nie, In-t gorn. dela, 2008. 236 P.

4. Dudko K. L., Shikanov A. I. Otsenka udaroopasnosti massiva po rezultatam podzemnogo elektroprofili-rovaniya na Tashtagolskom rudnike [Evaluation of the results of an array of bump hazard of underground mine electric profiling on Tashtagol]. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Kuzbass State Technical University]. 2013. №.1. P. 10-12.

5. Kurlenya M. V., Kurlenya, A. A. Eremenko, B. V. Shrepp. Geomekhanicheskie problemy razrabotki zhelezorudnykh mestorozhdeniy Sibiri. Novosibirsk, Nauka, 2001. 184 P.

6. Matveev B. K. Elektrorazvedka. Moskva, Nedra, 1990. 368 P.

7. Yudin M. N., Yudin V. M. Matematicheskie modeli geoelektriki. Chast I. Sloistye modeli sred. Moskva, Ros. gos. geologo – razv. univ, 2007. 155 P.

8. Zubov K. N., Nemirovskiy A. E. Metod rascheta zazemlyayushchikh ustroystv proizvol-noy konfiguratsii v neodnorodnykh gruntakh [The method of calculation of any configuration of grounding devices in heterogeneous soils]. Vesti vysshikh uchebnykh Zavedeniy Chernozem'ya [News of higher educational institutions Chernozemya].2010. №.2. P. 21-26.

9. Khemming R. V. Chislennye metody. Moskva, Nauka, 1968. 400 P.

10. Korn G. A., Korn T. M. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov. Moskva, Nauka, 1974. 832 P.

11. Kaftanova Yu.V. Spetsial'nye funktsii matematicheskoy fiziki. Chast I. Kharkov, Novoe slovo, 2009. 178 P.

12. Matveev B. K. Elektrorazvedka pri poiskakh mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh. Moskva, Nedra, 1982. 375 P.

13. Dudko K. L., Shikanov A. I. Vliyanie geologicheskogo stroeniya elektroprofilya na kazhushcheesya elektrosoprotivlenie porod [Influence of geological structure elektroprofilya the apparent electrical resistivity rock]. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Kuzbass State Technical University].2015. №1. P. 11-13.

14. Ukazaniya po bezopasnomu vedeniyu gornykh rabot na mestorozhdeniyakh Gornoy Sho-rii, sklonnykh i opasnykh po gornym udaram. Novokuznetsk, Izd – vo VostNIGRI, 2001. 55 P.

15. Egorov, P. V., Ivanov V. V., Dyrdin V. V., Kovalenko V. A., Petukhov M. F., Krasil'nikov B. V., Kvochin V. A., Klimenko V. K., Renev A. A., Ludzish B. C., Fokin A. N. Spravochnoe posobie dlya sluzhb prognoza i predotvrashcheniya gornykh udarov na shakh-takh i rudnikakh. Moskva, Nedra, 1995. 240 P.

Received 15.05.2015