

ГОРНОЕ ДЕЛО

УДК 622.831

© Шустов Д.В., Ермашов А.О., 2012

**ПРОГНОЗ СДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ГОРНОГО МАССИВА  
ТИШИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МЕТОДАМИ КОНЕЧНЫХ  
И ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

**Д.В. Шустов, А.О. Ермашов**

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Россия

Рассматриваются вопросы, связанные с деформированием скального трещиноватого массива на основе учета полной диаграммы деформирования пород по контактам. Расчеты сдвижений и деформаций скальных трещиноватых массивов производятся путем моделирования методами дискретных и конечных элементов. В работе произведен прогноз сдвижений и деформаций горного массива Тишинского свинцово-цинкового месторождения и описано их влияние на состояние горных выработок.

Интенсивное развитие численных методов моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) горного массива блочной и трещиноватой структуры привело к развитию нового метода дискретных элементов. В отличие от методов, описывающих сплошную среду, в методе дискретных элементов модели деформирования задаются как для самих блоков, так и для поверхностей их контактов. При этом определяющим фактором в расчетах сдвижений массива, разбитого трещинами, является сдвиг, реализуемый по трещине.

В рамках данной работы использовался программный комплекс 3DEC, имеющийся на кафедре маркшейдерского дела, геодезии и геоинформационных систем ПНИПУ.

Для описания прочности контакта горных пород применялся нелинейный критерий разрушения Джагера.

На основе реализованного в программном комплексе 3DEC алгоритма учета деформирования по системам трещин был выполнен прогноз сдвижений и деформаций горного массива и земной поверхности при отработке Тишинского месторождения.

Модель Тишинского месторождения калибровалась на основе данных инструментальных наблюдений, проводимых при непосредственном участии автора.

В результате выполненного расчета были сделаны выводы о возможности дальнейшей разработки месторождения и эксплуатации капитальных выработок.

**Ключевые слова:** метод дискретных элементов, метод конечных элементов, трещиноватость, слоистость, скальный массив, критерий разрушения Джагера.

**FORECAST OF DISPLACEMENT AND DEFORMATIONS OF ROCK MASS  
AT TISHINSKIY DEPOSIT BY FINAL AND DISCRETESELEMENTS**

**D.V. Shustov, A.O. Ermashov**

Perm National Research Polytechnic University, Russian Federation

Problems associated with the deformation of the rock fractured array based accounting full diagram of deformation of rocks by contact. Calculations of displacement and deformation of fractured rock arrays produced by the method of discrete modeling and finite element analysis. The work performed forecast of displacement and deformation of rock mass Tishinsky lead-zinc deposits and describes their impact on mining.

Intensive development of numerical methods for modeling the stress-strain state (SSS) mountain led to the development of a new method of modeling VAT array block and cracked structure - the discrete element method. In contrast to methods that describe a continuous medium, the method of discrete element models of deformation are given both for the blocks, and the surfaces they contact. In this case, the determining factor in the calculation of displacement array, cracked shift is being implemented by the fracture.

In this work, to use a software complex 3-DEC, is available at the Department of Surveying, Geodesy and GIS PNIPU.

To describe the strength of the contact rocks to use a nonlinear failure criterion Jagger.

On the basis of the implemented in the software package 3DEC algorithm accounting for deformation fracture system was a forecast of displacement and deformation of rock mass and the earth's surface at working Tishinsky field.

Tishinsky field calibrated model based on instrumental observations carried out with the direct participation of the author of this article.

In the results of the calculations were made conclusions about the possibility of further development of the field of operation and capital developments.

**Key-words:** discrete element method, discrete/distinct element method, finite element method, fracture, bedding, a rock, fracture criterion Jagger.

### Характеристика Тишинского месторождения

Тишинское свинцово-цинковое месторождение представлено богатыми, почти вертикально залегающими (75–85°) рудными телами, составляющими основную и северо-западную залежи. Основные запасы руды сосредоточены в основной залежи, а преобладающее распространение в ней имеют прожилково-вкрапленные руды. Мощность рудной зоны по месторождению достигает 200 м, размеры по простиранию – до 2 км. Толща вмещающих пород имеет согласное с рудным телом падение и состоит из карбонато-серицитокварцевых, карбонато-серицитовых, хлорито-серицитокварцевых и других сланцев. Углы падения плоскостей расщепления крутые (70–85°), азимут падения колеблется от 320–330 до 20–30°, т.е. сланцеватость пород всяческого бока имеет падение в выработанное пространство и в значительной степени определяет развитие процессов сдвижения. На месторождении выделено восемь систем трещин, охватывающих весь диапазон углов и азимутов падения. Наиболее трещиноватыми породами являются алевролиты. Трещины в них образуют три хорошо выраженные системы: пологие с азимутом падения от 130 до 250°, крутопадающие (60–80°) с азимутами 150–185°, крутопадающие на северо-запад с азимутами 300–320° и углами падения 67–75°. Таким образом, вмещающие породы месторождения являются выраженными структурно неоднородными.

Для оценки напряженного состояния нижних горизонтов в 2002–2003 гг. институтами ВНИИЦВЕТМЕТ и ПГТУ на Тишинском руднике был выполнен комплекс работ по определению параметров естественного поля напряжений на уровне 11-го, 14-го и 16-го горизонтов. Эксперименты показали, что на уровне 11–16-го горизонтов напряжения примерно равны по всем направлениям и составляют

12–14 МПа, т.е. исходное напряженное состояние горного массива Тишинского рудника на уровне 11–16-го горизонтов близко к гидростатическому.

Общий характер развития процессов сдвижения южного фланга месторождения контролируется с помощью наблюдательной станции, заложенной в 1987 г., которая состоит из поверхностной линии реперов и 5 подземных профильных линий (рис. 1). Подземные профильные линии расположены в квершлагах к шахте Тишинская на 6-м, 7-м и 10-м горизонтах, в квершлагах к вентиляционному стволу на 11-м горизонте и в выработке наклонного съезда.

### Выбор и реализация модели деформирования контактов скальных пород и критерия разрушения

В рамках данной работы использовался программный комплекс метода дискретных элементов 3DEC, имеющийся в ПНИПУ [1, 2]. Свойства контакта в упругой зоне задаются коэффициентами нормальной и касательной жесткости. Для описания поведения контакта между трещинами была реализована и внедрена в программный продукт модель, учитывающая полную диаграмму деформирования (рис. 2) [3–8].

В настоящее время разработано достаточно много различных критериев разрушения горных пород. Наиболее простым из них в плане параметрического обеспечения и вместе с тем достаточно точно описывающим прочность контакта горных пород является критерий Джагера [4, 5]:

$$\tau_{\text{res}} = \sigma_n \cdot \tan(\varphi_G) + c_G [1 - \exp(-b \sigma_n)],$$

где  $\sigma_n$  – нормальное к плоскости контакта напряжение;  $\varphi_G$ ,  $c_G$  – угол внутреннего трения и сцепление породы;  $b = [\tan(\varphi_s + i_0) - \tan(\varphi_G)] / c_G$ ;  $\varphi_s$  – угол внутреннего трения поверхности раздела;  $i_0$  – угол дилатансии при  $\sigma_n = 0$ .

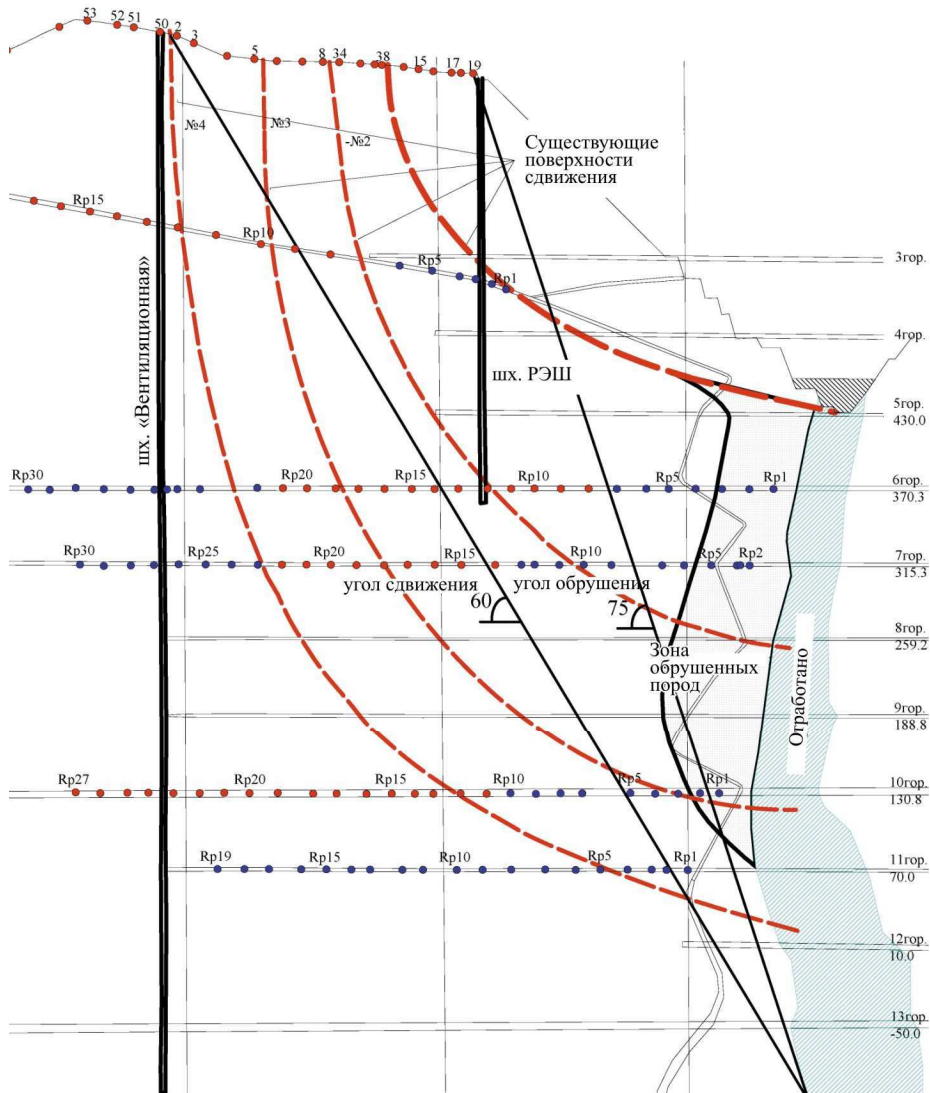


Рис. 1. Наблюдательная станция за сдвижением горных пород НА: южном фланге Тишинского месторождения

При  $\sigma_n = 0$  критерий Джагера имеет вид  $\tau_{res} = \sigma_n \cdot \tan(\varphi_G)$ , а при  $\sigma_n \rightarrow \infty$  переходит в  $\tau_{res} = \sigma_n \cdot \tan(\varphi_G) + c_G$ , т.е. предполагается, что при высоких нормальных напряжениях происходит полное смыкание стенок и прочность поверхности раздела соответствует прочности ненарушенной породы. Таким образом, для расчета сдвижений скального массива реализована уп-

руговязкопластическая модель деформирования контактов по системам трещин на допредельной и запредельной стадиях с применением критерия разрушения Джагера в программном комплексе метода раздельно-блочных элементов 3DEC.

Модель была реализована в программе путем создания пользовательской библиотеки (\*.dll).

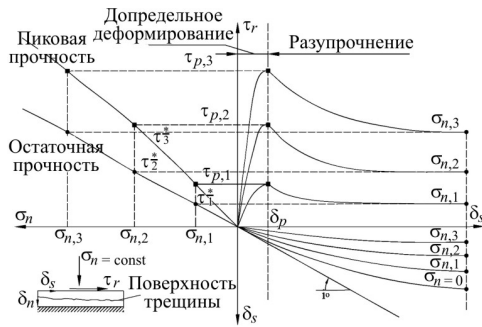


Рис. 2. Полная диаграмма деформирования по контакту скальных пород

### Моделирование напряженно-деформированного состояния горного массива

Для анализа напряженно-деформированного состояния массива были разработаны конечно-элементная и дискретно-элементная модели [1]. Основное назначение выполненных расчетов состоит в калибровке параметров реализованной модели деформирования горных пород и общем анализе напряженного состояния массива.

Степень пригодности любых модельных представлений для практического применения определяется соответствием расчетных параметров замеренным в натуре величинам.

Применительно к южному флангу Тишинского месторождения в качестве замеренных величин выступают значения оседаний и горизонтальных сдвижений реперов, замеренных на комплексной наблюдательной станции в районе ствола Вентиляционный (профильная линия «Шх. РЭШ»), на 6-м, 7-м и 10-м горизонтах Тишинского рудника. Для калибровки модели использовались результаты наблюдений 2008 и 2009 гг.

В расчетах было получено преимущественное развитие горизонтальных сдвижений по сравнению с оседаниями, что является прямым следствием высоких горизонтальных напряжений, действующих в массиве Тишинского месторождения. При этом в расчетах использовались

параметры естественного поля напряжений, определенные прямыми шахтными экспериментами, что повышает достоверность полученных выводов и рекомендаций.

Установлено, что использованная модель деформирования скального массива с учетом допредельной и запредельной стадий деформирования по системам трещин, реализованная в методе конечных элементов (МКЭ), хорошо работает в той части мульды сдвижения, которая характеризуется горизонтальными и вертикальными сдвигами от 0 до 200–300 мм. В части мульды, определяемой углом сдвижения и углом обрушения, т.е. там, где сосредоточены наиболее опасные для подрабатываемых объектов деформации, она дает исключительно заниженные значения оседаний и горизонтальных сдвижений и, соответственно, горизонтальных и вертикальных деформаций (рис. 3) [9–15].

В связи с этим для прогноза сдвижений в этой части мульды сдвижения рекомендуется использовать метод дискретных элементов (МДЭ). В целом его применение с использованием реализованной геомеханической модели среды с дилатансией дает результаты в 2–5 раз более достоверные по сравнению с измеренными величинами сдвижений в мульде, чем метод конечных элементов с аналогичной геомеханической моделью (таблица).

Целью последующих расчетов являлось определение прироста сдвижений и деформаций относительно существующего уровня при дальнейшей отработке запасов Тишинского рудника. В этой связи на основе разработанной модели производился расчет дополнительных сдвижений и деформаций при выемке руды до 20-го горизонта. Использовался как МКЭ, так и МДЭ. Результаты расчета показали практически равные величины прироста оседаний по обоим методам, однако МДЭ дал существенно большие величины прироста горизонтальных сдвижений, особенно выше 9-го горизонта

## Прогноз сдвижений и деформаций горного массива Тишинского месторождения

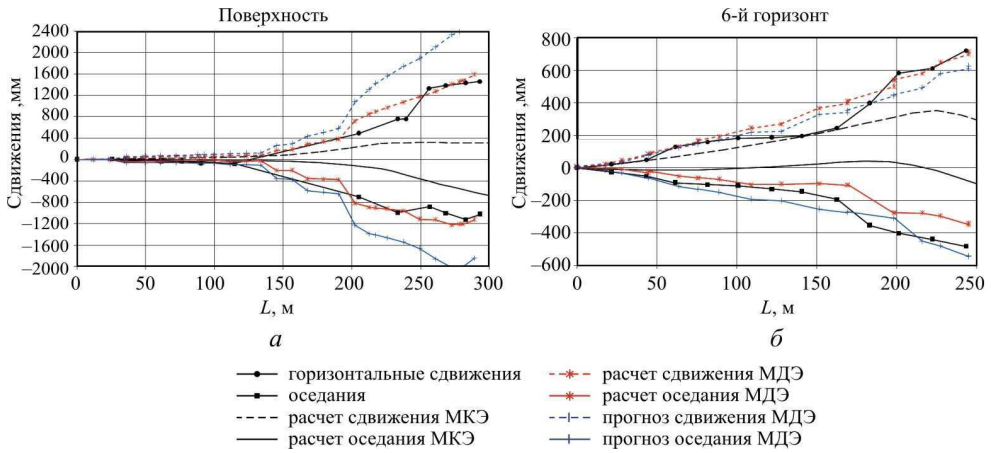


Рис. 3. Сравнение расчетных и замеренных сдвижений на профильных линиях «Шх. РЭШ» (а); на 6-м горизонте Тишинского рудника (б)

### Среднеквадратические отклонения (СКО) рассчитанных величин сдвижений от замеренных

Профильная линия	СКО МДЭ, мм/%		СКО МКЭ, мм/%	
	горизонтальные сдвижения	оседания	горизонтальные сдвижения	оседания
Поверхность	135/25	92/20	610/114	379/84
6-й горизонт	59/22	89/46	157/58	250/129
7-й горизонт	72/45	42/84	152/94	66/134
10-й горизонт	23/20	19/362	76/66	24/466

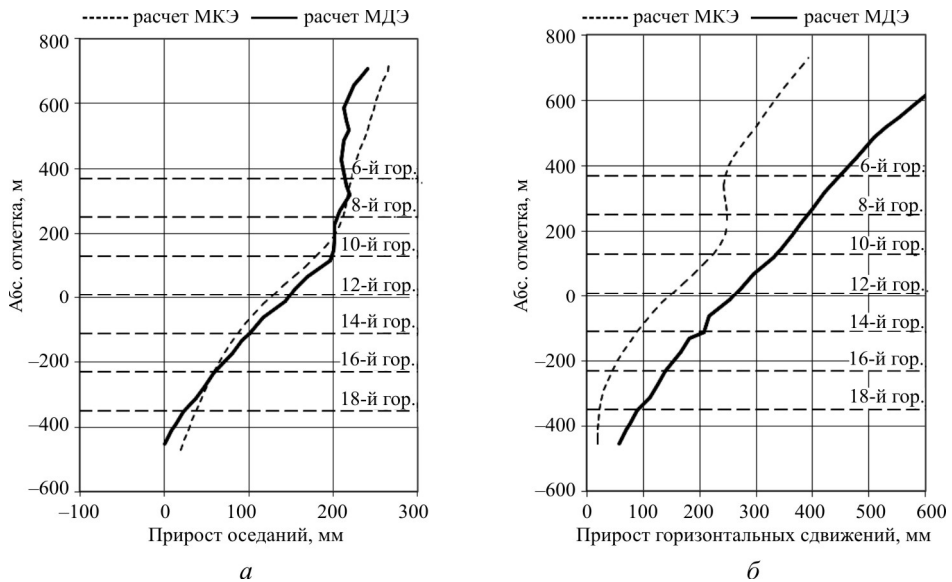


Рис. 4. Прирост горизонтальных сдвижений (а) и оседаний (б) по оси ствола «Вентиляционный» при отработке руды до 20-го горизонта

(рис. 4). Связано это с незатухающим деформированием борта карьера при расчете методом дискретных элементов

Результаты расчетов показывают несущественный прирост сдвижений в районе ствола «Вентиляционный». Так, при отработке руды до 20-го горизонта прирост оседаний земной поверхности в районе ствола составит: при расчете методом дискретных элементов  $\Delta\eta = 240$  мм, горизонтальных сдвижений –  $\Delta\xi = 670$  м и при расчете методом конечных элементов  $\Delta\eta = 270$  мм,  $\Delta\xi = 390$  м. Как было доказано ранее, МДЭ дает более достоверные результаты, на которые стоит опираться при работе.

Прирост горизонтальных деформаций на земной поверхности в районе ствола находится в пределах 0,2–0,7 мм/м. Если учесть, что в настоящее время горизонтальные деформации в районе ствола составляют 0,5–1,0 мм/м, то такой прирост приведет к возникновению опасных деформаций.

### Выводы

1. Учет допредельной стадии деформирования скальных пород по системам трещин оказывает существенное влияние на величины сдвижений массива.

2. Для расчета сдвижений земной поверхности и горного массива необходимо

использовать нелинейные критерии разрушения горных пород. В практических расчетах целесообразно применять критерий разрушения Джагера, так как он учитывает традиционные характеристики прочности горных пород, получаемые при инженерно-геологических изысканиях.

3. В целом метод дискретных элементов с использованием реализованной геомеханической модели среды с дилатансией дает результаты в 2–5 раз более достоверные по сравнению с измеренными величинами сдвижений в мульде, чем метод конечных элементов с аналогичной геомеханической моделью при расчете трещиноватых скальных массивов.

4. На основе реализованного в программном комплексе 3DEC алгоритма учета деформирования по системам трещин в допредельной и запредельной стадиях был выполнен прогноз сдвижений и деформаций горного массива и земной поверхности при отработке Тишинского месторождения до 20-го горизонта. Установлено, что отработка залежи на Тишинском месторождении от 14-го до 20-го горизонтов приведет к появлению деформаций ствола «Вентиляционный», которые могут вызвать нарушение его нормальной эксплуатации.

### Список литературы

1. Jing L., Stephansson O. Fundamentals of discrete element methods for rock engineering. – London: Elsevier Science, 2002. – 450 p.
2. Itasca Software Products – 3DEC / Itasca Consulting Group Inc. – Minneapolis, 2007.
3. Erban P.-J. Raumlische Finite-Element-Berechnungen an idealisierten Diskontinua unter Berücksichtigung des Scher- und Dilationsverhaltens von Trennflächen. Veröffentlichungen des Institutes fuer Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau der RWTH Aachen, Heft 14. – 1986. – 218 p.
4. Leichnitz W. Mechanische eigenschaften von felstrennflächen im direkten scherversuch // Veroeff. des Inst. fuer Bodenmechanik und Felsmechanik der TH Karlsruhe, Heft. – 1981. – 89. – P. 100.
5. Jaeger G.C. Friction of Rocks and stability of rock slopes // Geotechnique. – 1971. – 21/2. – P. 97–134.
6. Cundall P.A., Hart R.D. Numerical modelling of discontinua. Keynote lecture // Proc. 1st US Conf. on Discrete Element Methods. – Colorado, 1992. – 9–2. – P. 101–113.
7. Goodman R.E. Methods of geological engineering in discontinuous rocks. – San Francisco: West Publishing Company, 1976. – P. 472.

8. Wittke W. Rock mechanics, Theory and applications with case histories. – Berlin; Heidelberg; New York; London; Paris; Tokio; Hongkong; Barcelona: Springer-Verlag, 1990. – 1075 p.
9. Кашников Ю.А., Ашихмин С.Г. Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья. – М.: Недра, 2007. – 486 с.
10. Ашихмин С.Г. Расчеты сдвижений и деформаций подрабатываемых скальных массивов рудных месторождений методом конечных элементов: дис. ... канд. тех. наук. – Пермь, 1995. – 145 с.
11. Зотеев В.Г., Зотеев О.В., Ножин А.Ф. Метод и программа расчета НДС конструктивных элементов горных выработок в сплошном и трещиноватом массиве // Численные методы оценки устойчивости подземных сооружений. – Апатиты, 1978. – С. 33–36.
12. Кашников Ю.А. О закономерностях сдвижения массива пород при разработке мощных крутопадающих рудных тел // Совершенствование методов и средств производства маркшейдерско-геодезических работ. – Л.: Изд-во ЛГИ, 1987. – С. 16–19.
13. Кашников Ю.А., Якушина Е.М., Ашихмин С.Г. Деформирование скального массива по системам трещин // Изв. вузов. Горный журнал. – 1992. – № 3. – С. 75–80.
14. Квочин В.А. Управление сдвижением и удароопасностью горного массива при разработке железорудных месторождений Сибири на основе изучения их геодинамики: дис. ... д-ра техн. наук. – Новокузнецк, 2000. – 78 с.
15. Сашурин А.Д. Сдвижение горных пород на рудниках черной металлургии. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 1999. – 268 с.

#### References

1. Jing L., Stephansson O. Fundamentals of discrete element methods for rock engineering. London: Elsevier Science, 2002. 450 p.
2. Itasca Software Products – 3DEC. Itasca Consulting Group Inc. Minneapolis, 2007.
3. Erban P.-J. Raumlische Finite-Element-Berechnungen an idealisierten Diskontinuaunter Berücksichtigung des Scher- und Dilationsverhaltens von Trennflächen. Veröffentlichungen des Institutes fuer Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau der RWTH Aachen, Heft 14, 1986. 218 p.
4. Leichnitz W. Mechanische eigenschaften von felstrennflächen im direkten scherversuch. *Veroeff. des Inst. fuer Bodenmechanik und Felsmechanik der TH Karlsruhe*, Heft. 1981, no. 89, p. 100.
5. Jaeger G.C. Friction of Rocks and stability of rock slopes. *Geotechnique*, 1971, no. 21/2, pp. 97–134.
6. Cundall P.A., Hart R.D. Numerical modelling of discontinua. Keynote lecture. *Proc. 1st US Conf. on Discrete Element Methods*. Colorado, 1992, 9–2, pp. 101–113.
7. Goodman R.E. Methods of geological engineering in discontinuous rocks. San Francisco: West Publishing Company, 1976. 472 p.
8. Wittke W. Rock mechanics, Theory and applications with case histories. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokio, Hongkong, Barcelona: Springer-Verlag, 1990. 1075 p.
9. Kashnikov Ju.A., Ashihmin S.G. Mehanika gornyh porod pri razrabotke mestorozhdenij uglevodородного syr'ja [Rock mechanics in the development of hydrocarbon fields]. Moscow: Nedra, 2007. 486 s.
10. Ashihmin S.G. Raschety sdvizenij i deformatcij podrabatyvaemyh skal'nyh massivov rudnyh mestorozhdenij metodom konechnyh jelementov [Calculations of displacement and strain undermined rock massifs of ore deposits by finite element method]. Perm, 1995. 145 s.
11. Zoteev V.G., Zoteev O.V., Nozhin A.F. Metod i programma rascheta НДС konstruktivnyh jelementov gornyh vyrabotok v sploshnom i trewinovatom massive [The method of calculation of VAT and the program of structural elements in the continuous mining and cracked array]. *Chislennye metody ocenki ustojchivosti podzemnyh sooruzhenij*. Apatity, 1978, pp. 33–36.
12. Kashnikov Ju.A. O zakonemernostjah sdvizhenija massiva porod pri razrabotke mownyh krutopadajuviuh rudnyh tel [On the laws of rock mass displacement in the development of powerful steep ore bodies]. Leningrad: Izd-vo LGI, 1987, pp. 16–19.

13. Kashnikov Ju.A., Jakushina E.M., Ashihmin S.G. Deformirovanie skal'nogo massiva po sistemam trevin [Deformation of the rock mass for a system of cracks]. *Izv. vuzov. Gornyj zhurnal*, 1992, no. 3, pp. 75–80.

14. Kvochin V.A. Upravlenie sdvizheniem i udaroopasnost'ju gornogo massiva pri razrabotke zhelezorudnyh mestorozhdenij Sibiri na osnove izuchenija ih geodinamiki [Management of displacement and bump hazard rock during the development of iron ore deposits in Siberia, through the study of Geodynamics]. Novokuzneck, 2000. 78 s.

15. Sashurin A.D. Sdvizhenie gornyh porod na rudnikah chernoj metallurgii [Strata movement in mines Steel]. Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 1999. 268 s.

#### Об авторах

**Шустов Денис Владимирович** (Пермь, Россия) – доцент кафедры маркшейдерского дела, геодезии и геоинформационных систем Пермского национального исследовательского политехнического университета (614600, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: denispstu@mail.ru).

**Ермашов Алексей Олегович** (Пермь, Россия) – аспирант кафедры маркшейдерского дела, геодезии и геоинформационных систем Пермского национального исследовательского политехнического университета (614600, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; geramd-06@mail.ru).

#### About the authors

**Shustov Denis Vladimirovich** (Perm, Russian Federation) – docent, Department for mine survey, geodesy and geoinformation systems, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky ave., 29; e-mail: denispstu@mail.ru).

**Ermashov Aleksey Olegovich** (Perm, Russian Federation) – PhD student, Department for mine survey, geodesy and geoinformation systems, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky ave., 29; e-mail: geramd-06@mail.ru).

Получено 10.05.2012