

УДК 622.02:622.83:622.5

**И.В. Милетенко, Н.А. Милетенко, В.Н. Одинцев**  
**ОЦЕНКА ТЕХНОГЕННОЙ НАРУШЕННОСТИ**  
**РАЗДЕЛИТЕЛЬНОГО ЦЕЛИКА\***

Рассмотрен новый теоретический подход к моделированию техногенной нарушенности массива, основанный на расчете неоднородного напряженного состояния пород, вероятностной оценке прочности массива и некоторых положениях теории перколяции, с использованием которой в массиве пород рассматриваются случайные соединения (кластеры) нарушенных трещинных контактов. Цель исследований заключается в анализе условий образования интегрального перколяционного кластера во всей области массива, который определяет особенности развития геопроцессов, связанных с просачиванием воды через массив. С использованием описанной схемы компьютерного моделирования оценивалось состояние разделительного целика, отделяющего дно карьера от подземного выработанного пространства. Проведенное моделирование позволило получить наглядное представление о возможных состояниях техногенной нарушенности целиков при различных его размерах и значениях величины бокового распора. Установлено, что при развитии горных работ и изменении напряженного состояния разделительного целика возможны ситуации, когда целик может резко изменить свою интегральную проницаемость. Большую роль в геомеханическом состоянии разделительного целика играют природные напряжения в нетронутом массиве пород. Для обоснованного заключения о возможности уменьшения мощности целика следует провести натурную оценку величины горизонтальных напряжений горных пород.

*Ключевые слова:* горные породы, напряженное состояние, трещинные контакты, наведенная нарушенность, теория перколяции, проницаемость.

---

**В** работе используется новый теоретический подход для оценки техногенной нарушенности массива, основанный на расчете напряженного состояния пород, вероятностной оценке прочности массива и некоторых положениях теории перколяции [1]. Под техногенной нарушенностью массива понимается изменение состояния трещинных контактов под влиянием процесса перераспределения напряжений, вызванного горными работами. Нарушение даже части трещинных контактов может иметь негативные последствия, поскольку при нарушении контактов значительно возрастает их водопроницаемость и создаются условия для образования магистрального водопроводящего канала. Это может иметь большое значение для прогноза безопасности подземных горных работ в сложных гидрогеологических условиях [2, 3].

В крупномасштабном приближении массив пород считается сплошной упругой средой. Методом конечных элементов определяются особенности техногенного перераспределения напряжений в исследуемой области массива – разделительном целике. Далее с учетом этих особенностей область разбивается на  $N$  малых равных подобластей. В подобластях известные из расчета напряжения усредняются и считаются однородными.

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-05-00482).

Для оценки прочностного состояния подобласти рассматривается эквивалентное напряжение Мизеса  $\sigma_e$ , определяемое через главные напряжения  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  соотношением:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2}{2}}$$

Прочностное условие для подобласти рассматривается в рамках вероятностного подхода. Прочность  $\sigma^*$  и напряжения  $\sigma_e$  считаются случайными величинами, для которых известны параметры их нормальных распределений: средние значения напряжения Мизеса и предела прочности  $(\bar{\sigma}_e)_i$  и  $(\bar{\sigma}^*)_i$ ; стандартные отклонения напряжения и прочности  $\Delta_{\sigma_e}$  и  $\Delta_{\sigma^*}$  соответственно,  $1 \leq i \leq N$ .

Вероятность  $p_i$  выполнения для  $i$ -й подобласти прочностного условия  $\sigma_e \geq \sigma^*$ , означающего развитие в ней необратимых изменений, можно записать с помощью соотношений, полученных в строительной механике [4]:

$$p_i = \frac{1}{2} + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\beta_i} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx, \quad \beta_i = \frac{(\bar{\sigma}_e)_i - (\bar{\sigma}^*)_i}{\sqrt{\Delta_{\sigma_e}^2 + \Delta_{\sigma^*}^2}} \quad (1)$$

После крупномасштабной оценки рассматривается более мелкий масштабный уровень и учитывается блочная структура массива. Структурные блоки породы представляются квадратными элементами, количество которых в подобласти зависит от соотношения размеров подобласти и структурного блока.

Элемент считается нарушенным, если в нем необратимо изменены трещинные контакты. Если нарушенные элементы прилегают друг к другу хотя бы одной стороной, то протяженность нарушенного контакта, очевидно, возрастает. Соединение контактирующих нарушенных элементов образует кластер нарушенности массива.

Местоположение нарушенных элементов – случайный фактор. Однако в хаотическом расположении элементов есть свои закономерности, которые исследуются в рамках теории перколяции [5]. Главная цель исследований этой теории состоит в определении вероятности и закономерностей образования цепочек (кластеров) связанных объектов в неупорядоченных средах или структурах. При этом считаются известными вероятность нарушенных элементов в рассматриваемой структуре и геометрическая схема контакта элементов. Решающее значение для изменения качественного состояния рассматриваемой области со структурой имеет образование перколяционного (соединяющего) кластера, простирающегося от одной границы области до другой.

В массиве пород в результате случайного соединения нарушенных контактов может образоваться перколяционный кластер в подобласти, а при совокупном рассмотрении всех подобластей – интегральный перколяционный кластер из нарушенных трещинных контактов во всей области массива. Здесь, в отличие от классической теории перколяции, рассматривается не одна область с известной вероятностью нарушенных элементов, а совокупность подобластей, для каждой из которых известна своя доля нарушенных элементов. Процедуры построения кластеров нарушенности элементов в подобластях и интегрального перколяционного кластера нарушенности для всей области массива реализованы в виде компьютерной программы.

Моделирование техногенной нарушенности массива пород включает следующие этапы: расчет с помощью МКЭ напряженного состояния массива; раз-

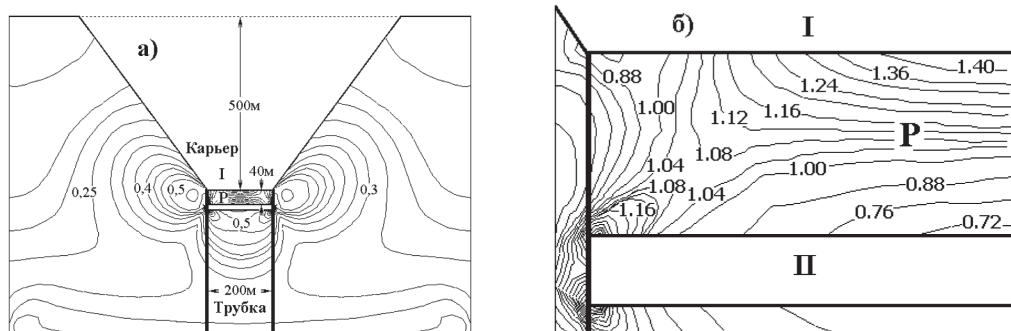
биение исследуемой области массива на подобласти и вычисление в них среднего значения напряжения Мизеса; определение на основе соотношений (1) вероятности выполнения прочностного условия в каждой подобласти и доли нарушенных элементов в ней; построение в рамках статистического моделирования кластеров техногенной нарушенности, связывающих нарушенные элементы, и определение вероятности образования перколяционного (сквозного) кластера, простирающегося от одной границы исследуемой области до другой.

С использованием описанной схемы компьютерного моделирования оценивалось состояние разделительного целика, отделяющего дно карьера и подземное выработанное пространство для горно-геологических условий, характерных для разработки крутопадающей алмазонасной трубки «Мир». В упрощенной постановке (при предположении однородности поля напряжений в целике) подобная задача решалась в [2].

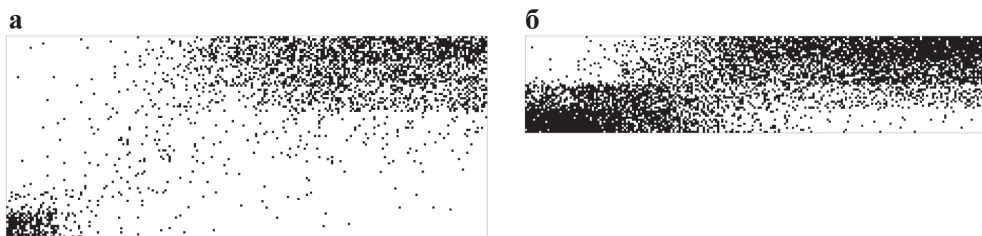
Сначала в условиях плоской деформации решена задача о напряженном состоянии массива пород в горизонтальном целике, разделяющем дно карьера (I) и подземное выработанное пространство (II) (рис. 1, а). При этом принимались следующие значения параметров расчета: глубина карьера 500 м, угол наклона бортов  $50^\circ$ , мощность целика, разделяющего дно карьера и подземное выработанное пространство, 40 м, длина целика 200 м; плотность вмещающих пород  $2,5 \text{ т/м}^3$ , прочность на одноосное сжатие образцов пород, слагающих целик,  $\sigma^* = 25 \text{ МПа}$ , характерный размер структурного блока 0,42 м. Величина природных вертикальных напряжений в массиве пород определяется весом пород. Величина природных горизонтальных напряжений достоверно неизвестна, поэтому рассматривались геомеханические ситуации с разными значениями коэффициента бокового распора  $\alpha$ : 0,6; 0,8. На поверхности карьера и подземного выработанного пространства граничные напряжения, нормальные к поверхности, приняты равными нулю.

Расчеты напряженного состояния целика выполнены методом конечных элементов. Некоторые обработанные результаты расчетов, например изолинии  $\sigma/\sigma^*$ , показаны на рис. 1 для  $\alpha = 0,8$ . Вследствие симметрии на рис. 1, б показана только левая часть целика.

Далее область целика была разбита на 160 равных подобластей, для каждой из которых определены усредненные значения эквивалентного напряжения Мизеса и проведено статистическое моделирование. Эквивалентное напряже-



**Рис. 1. Изолинии отношения напряжения Мизеса к прочности массива при мощности разделительного целика 40 м и при коэффициенте бокового распора 0,8:** а – изолинии в масштабе карьера; б – детальная картина изолиний в левой части разделительного целика (I – дно карьера, II – подземное выработанное пространство)

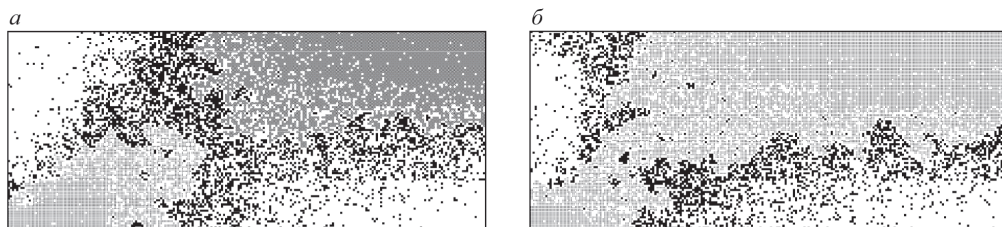


**Рис. 2. Возможная картина техногенной нарушенности разделительного целика (левая половина) при коэффициенте бокового распора и мощности целика: а – 40 м, б – 20 м. Черные точки – элементы с нарушенными трещинными контактами**

ние Мизеса и прочность массива рассматривались как случайные величины с нормальным распределением. В качестве средних значений напряжения Мизеса использовались напряжения, найденные из расчета с помощью МКЭ, среднее значение прочности во всех подобластях принималось равным значению  $\sigma^*$ . Для массива пород средние квадратичные отклонения в распределении напряжений и прочности не известны. Для определенности в модельном примере приняты следующие значения стандартных отклонений:  $\Delta_{\sigma_e} = \Delta_{\sigma^*} = 4$  МПа (в относительных единицах 0,2 от значения прочности  $\sigma^*$ ). С помощью соотношений (1) определены вероятности выполнения прочностного условия в подобластях  $p_i$  для каждой  $i$ -й подобласти.

Исходя из известного усредненного размера структурного блока в массиве, в каждой подобласти рассматривалось 144 элемента, отражающих блочную структуру горных пород. Значения  $p_i$  как значения доли нарушенных элементов в подобластях использованы в дальнейшем при статистических построениях кластеров нарушенных элементов во всех подобластях. С помощью специальной программы эти кластеры объединялись для выявления интегрального кластера во всей области разделительного целика. Проведено 10 построений интегральных кластеров в целике для каждого из рассмотренных значений коэффициентов бокового распора и различной мощности целика. Некоторые картины нарушенности и конфигурации кластеров показаны на рис. 2–4.

Из рис. 2, а следует, что при мощности целика 40 м и коэффициенте бокового распора 0,6 наиболее нарушенные области в целике формируются в краевой нижней и в верхней центральной области. В промежуточной области, как установлено во всех десяти построениях, нарушаются лишь отдельные элементы. В этом случае вероятность образования интегрального сквозного



**Рис. 3. Возможные картины техногенной нарушенности в левой части целика, мощностью 40 м, при коэффициенте бокового распора. Нарушенные блоки обозначены черным цветом, наиболее крупные соединения нарушенных блоков – оттенками серого цвета: а – отсутствие сквозного кластера, соединяющего верхнюю и нижнюю части целика; б – образование сквозного кластера (показан одним оттенком серого цвета)**



**Рис. 4. Возможная картина нарушенности левой части целика мощностью 20 м при  $\alpha = 0,8$**

кластера из нарушенных элементов, соединяющего дно карьера и подземное выработанное пространство, пренебрежимо мала.

Если мощность разделительного целика уменьшается до 20 м, то возможные картины наведенной нарушенности соответствуют той, что показана на рис. 2, б. Области наведенной нарушенности в краевой нижней и в верхней центральной части целика близки к соединению, но непосредственного контакта этих областей еще нет.

Техногенная нарушенность целика зависит от природных боковых (горизонтальных) напряжений. Так при коэффициенте бокового распора  $\alpha = 0,8$  выявляются иные качественные ситуации. На рис. 3, а показан один из возможных случаев образования крупных кластеров нарушенности в центральной верхней и нижней крайней части целика, сквозной кластер отсутствует. На рис. 3 б – другая возможная картина наведенной нарушенности, полученная при тех же условиях. Она соответствует случаю образования мощного сквозного кластера нарушенности, показанного одним оттенком серого цвета.

Для статистической оценки вероятности образования сквозного интегрального кластера осуществлены 30 независимых испытаний методом Монте – Карло, по результатам которых установлены математическое ожидание вероятности образования сквозного кластера и границы доверительного интервала. С надежностью 0,95 искомая вероятность находится в интервале . Таким образом, при мощности целика 40 м случай отвечает пограничной ситуации в отношении образования сквозного кластера техногенной нарушенности массива пород.

В случае, когда мощность целика уменьшается до 20 м в нем формируется область наведенной нарушенности, которая практически охватывает весь целик (рис. 4).

Обсуждение результатов. Проведенное моделирование наведенной нарушенности массива пород позволяет получить наглядное представление о возможных состояниях техногенной нарушенности целика при различных его размерах. При моделировании отчетливо проявляются два различных фактора – вероятность образования сквозного кластера нарушенности и возможная конфигурация кластера. Эти факторы влияют на особенности развития геопроцессов, связанных с просачиванием воды через массив. Кластер техногенной нарушенности в трещинно-блочном массиве фактически определяет структуру наведенных техногенных каналов для движения воды.

В этой связи следует отметить один важный результат исследования, относящийся к ситуации перехода массива в состояние пластического деформирования. В зависимости от случайных факторов массив пород может быть либо интегрально непроницаемым (если крупные кластеры наведенной проницаемости не контактируют между собой), либо слабо проницаемым (если крупные кластеры контактируют по нескольким блокам), либо сильно проницаемым (если случайным образом формируется мощный кластер проницаемости во всей исследуемой области массива). Особенность этой ситуации состоит в том, что

массив пород даже при небольших случайных геомеханических возмущениях может скачкообразно изменить свою интегральную проницаемость вследствие соединения отдельных кластеров в мощный перколяционный кластер. На практике такое неожиданное резкое изменение режима просачивания воды может иметь катастрофические последствия.

Следует заметить, что в проведенном исследовании массив пород в целом рассматривался как однородная среда. Если учитывать ряд природных факторов, связанных с неоднородностью массива, сценарии проникновения воды в подземное пространство могут оказаться сложнее. Например, кластер нарушенности в неоднородной среде может трансформироваться в открытую протяженную магистральную трещину гидроразрыва, по которой возможно движение воды (см., например, [6]). Наличие зон локализации техногенных деформаций [3, 7], связанных с иерархической трещинной структурой массива, может существенно исказить выявленные здесь закономерности формирования техногенной нарушенности.

Несмотря на то, что исследование является теоретическим (численным) и включает ряд допущений, его результаты могут найти практическое приложение, если рассматривать результаты в сравнительном аспекте. Как показало моделирование, вероятность образования сквозного кластера наведенной нарушенности в разделительном целике зависит от особенностей природного поля напряжений, техногенного напряженного состояния целика и мощности целика. Так, если коэффициент бокового распора меньше 0,6 то при уменьшении мощности целика не следует ожидать резкого изменения картины, связанной с просачиванием воды через целик со дна карьера. Если коэффициент бокового распора равен 0,8, то уменьшение мощности целика может привести к резкому увеличению интенсивности просачивания воды в подземное выработанное пространство.

### **Основные выводы**

1. При развитии горных работ и изменении напряженного состояния разделительного целика возможны ситуации, когда целик может резко изменить свою интегральную проницаемость.

2. Большую роль в геомеханическом состоянии разделительного целика играют природные напряжения в нетронутым массиве пород. Для обоснованного заключения о возможности уменьшения мощности целика следует провести натурную оценку величины горизонтальных напряжений горных пород.

3. Для анализа риска опасного взаимовлияния природно-техногенных гидрогеологических и геомеханических процессов целесообразно проводить комплексное моделирование, которое включает как детерминированные, так и вероятностные модели.

---

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Милетенко И.В., Милетенко Н.А., Одинцев В.Н. Моделирование наведенной нарушенности массива пород вблизи горных выработок // ФТПРПИ. – 2013. – № 6. – С. 3–10.

2. Трубецкой К.Н., Милетенко И.В., Милетенко Н.А., Одинцев В.Н. Аналитическая оценка техногенной нарушенности предо-

хранительного целика / Проблемы обработки алмазоносного месторождения трубки «Мир» под толщей метегеро-ичерского водоносного комплекса. – М.: ИПКОН РАН, 2012.

3. Викторов С.Д., Иофис М.А., Одинцев В.Н. Разрушение массива горных пород и риск техногенных катастроф // Горный журнал. – 2005. – № 4. – С. 30–34.

4. Райзер В.Д. Теория надежности в строительном проектировании. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 1998.

5. Тарасевич Ю.Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы. – М.: Едиториал УРСС, 2002.

6. Одинцев В.Н., Милетенко И.В., Милетенко Н.А. Геомеханическая оценка изменения гидрогеологических условий налега-

ющих пород при скважинной гидродобыче железных руд // Маркшейдерия и недропользование. – 2010. – № 5. – С. 51–54.

7. Иофис М.А., Одинцев В.Н., Блохин Д.И., Шейнин В.И. Экспериментальное выявление пространственной периодичности наведенных деформаций массива горных пород // ФТПРПИ. – 2007. – № 2. – С. 21–27. **ПЛАБ**

---

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

---

Милетенко Игорь Васильевич – доктор технических наук, заместитель директора, e-mail: miletiv@mail.ru,

Милетенко Наталья Александровна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: nmilet@mail.ru,

Одинцев Владимир Николаевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: Odin-VN@yandex.ru, Институт проблем комплексного освоения недр РАН.

---

UDC 622.02:622.83:622.5

## EVALUATION OF TECHNOGENIC DESTRUCTION OF THE SEPARATING PILLAR

Miletenko I.V., Doctor of Technical Sciences, Deputy Director, e-mail: miletiv@mail.ru,

Miletenko N.A., Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, e-mail: nmilet@mail.ru,

Odintsev V.N., Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, e-mail: Odin-VN@yandex.ru, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences.

---

*The paper describes a new theoretical approach to simulation of technogenic destruction of the rock mass on the basis of calculation of inhomogeneous stress state of the rock mass, probabilistic analysis of strength of the rock mass and some statements of the theory of percolation that is used to analyze random clusters of disturbed crack contacts. The purpose of this study was to analyze conditions for generation of an integral percolation cluster in the entire rock mass region that determines peculiarities of development of geoprocesess associated with water leakage through the rock mass. The described computer modeling procedure was used to assess the state of the separating pillar that divided the quarry bottom from the underground opening. The modeling resulted in pictorial view of possible states of pillar technogenic destruction with respect to size of the pillar and magnitude of the lateral thrust. It was found that mining development and changes in the dividing pillar stress state might lead to certain situations associated with a dramatic change in the pillar integral permeability. Natural stresses in the unaffected rock mass play a great role in the geomechanical state of the separating pillar. Field measurements of rock horizontal stress are needed to make a sound conclusion on possibility of the pillar power reduction.*

*Key words: rock, stress state, crack contacts, induced destruction, theory of percolation, permeability.*

## REFERENCES

1. Miletenko I.V., Miletenko N.A., Odincev V.N. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*, 2013, no 6, pp. 3–10.

2. Trubeckoj K.N., Miletenko I.V., Miletenko N.A., Odincev V.N. *Analiticheskaja ocenka tehnogennoj narushennosti predokhranitel'nogo celika. Problemy otrabotki amazonosnogo mestorozhdeniya trubki «Mir» pod tolshej metegero-icherskogo vodonosnogo kompleksa* (Analytical assessment of safety pillar technogenic destruction. Problems of the Mir diamond pipe mining under the thickness of Metegero-Ichersky water-bearing complex), Moscow, IPKON RAN, 2012.

3. Viktorov S.D., Iofis M.A., Odincev V.N. *Gornyj zhurnal*, 2005, no 4, pp. 30–34.

4. Rajzer V.D. *Teorija nadezhnosti v stroitel'nom proektirovanii* (Theory of reliability in building design), Moscow, Izd-vo Associacii stroitel'nyh vuzov, 1998.

5. Tarasevich Ju.Ju. *Perkoljacija: teorija, prilozhenija, algoritmy* (Percolation: theory, applications, algorithms), Moscow, Editorial URSS, 2002.

6. Odincev V.N., Miletenko I.V., Miletenko N.A. *Markshejderija i nedropol'zovanie*, 2010, no 5, pp. 51–54.

7. Iofis M.A., Odincev V.N., Blohin D.I., Shejnin V.I. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2007, no 2, pp. 21–27.