

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622.83:624.046:551.491.7

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАВЕДЕННОЙ НАРУШЕННОСТИ МАССИВА ПОРОД ВБЛИЗИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

И. В. Милетенко, Н. А. Милетенко, В. Н. Одинцев

*Институт проблем комплексного освоения недр РАН,
Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

Предложен новый подход к моделированию техногенной нарушенности массива, основанный на расчете неоднородного напряженного состояния пород, вероятностной оценке прочности массива и некоторых положениях теории перколяции.

Массив горных пород, трещинные контакты, наведенная нарушенность, горные выработки, напряженное состояние, теория перколяции, проницаемость

Для решения актуальных проблем освоения и сохранения земных недр необходимы новые знания о геопроцессах, происходящих в техногенно измененных недрах, способах управления ими и предотвращения возможных негативных последствий [1]. Возникает необходимость разработки новых подходов и методов исследований, в том числе на основе теоретических обобщений методов учета изменчивости механических свойств горных пород. В настоящей работе предложен подход к моделированию техногенной нарушенности массива, основанный на расчете неоднородного напряженного состояния пород, вероятностной оценке прочности массива и некоторых положениях теории перколяции.

Скальные породы, как известно, неоднородны и повсеместно рассечены трещинами. При этом массив пород обычно характеризуется как трещинно-блочный, в котором выделяются структурные блоки, ограниченные системными трещинами. Деформационные и прочностные свойства массива зависят как от материала породы, так и от природных ослаблений — трещинных контактов. При изменении напряженного состояния массива в первую очередь необратимо изменяются (нарушаются) трещинные контакты — берега трещин приоткрываются, по ним происходит движение блоков.

В данной работе под техногенной нарушенностью массива понимается изменение состояния трещинных контактов под влиянием техногенного перераспределения напряжений. Из анализа натурных исследований следует, что при допредельном деформировании массива нарушение некоторой части трещинных контактов незначительно влияет на устойчивое состояние массива в целом, поскольку напряжения перераспределяются и воспринимаются ненару-

шенной частью массива. Однако в особых случаях, например при возможном просачивании воды через массив пород, 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.

Цель работы — разработка модели и моделирование случайных соединений из нарушенных трещинных контактов в измененном массиве пород как возможных каналов для движения свободной воды. В ходе моделирования проводится расчет неоднородного техногенного напряженного состояния пород с помощью метода конечных элементов (МКЭ) и вероятностная оценка прочности массива. Этот подход к учету изменчивости свойств горных пород в определенном смысле соответствует известному статистическому методу расчета прочности инженерных конструкций, в котором сначала решаются соответствующие детерминированные задачи расчета напряженного состояния, а затем эти решения используются в статистических оценках прочности [2].

МОДЕЛЬ

В крупномасштабном приближении массив пород считается сплошной упругой средой. Методом конечных элементов определяются особенности техногенного перераспределения напряжений в исследуемой области массива. Далее с учетом этих особенностей и геометрии области она разбивается на малые равные подобласти, например в виде квадратов, если рассматриваются условия плоской деформации. В подобластях известные из расчета напряжения усредняются и считаются однородными.

Способность массива противодействовать изменению состояния трещинных контактов будем характеризовать условной прочностью трещинно-блочного массива σ^* , которая связана с прочностью породы σ_0 , слагающей массив, посредством коэффициента структурного ослабления K , а именно $\sigma^* = K\sigma_0$. Коэффициент структурного ослабления зависит от прочностных свойств трещинных контактов и густоты трещин. Для реального массива его значение можно оценить, например, используя рекомендации [3]. Обычно значение K находится в диапазоне 0.5–0.9.

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

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

В инженерных оценках эквивалентное напряжение, включающее различные компоненты напряжений, сопоставляется с величиной, определяемой из опытов на одноосное нагружение. При детерминированном подходе критическое условие максимальной прочности подобласти и перехода ее в состояние пластического деформирования по трещинным контактам может быть записано в виде $\sigma_e = \sigma^*$.

Прочностное условие для подобласти будем рассматривать в рамках вероятностного подхода. В этом случае прочность σ^* и напряжения σ_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 Δ_{σ_e} и Δ_{σ^*} соответственно.

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]:

$$p_i = \frac{1}{2} + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\beta_i} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx, \quad (1)$$

где

$$\beta_i = \frac{(\bar{\sigma}_e)_i - (\bar{\sigma}^*)_i}{\sqrt{\Delta_{\sigma_e}^2 + \Delta_{\sigma^*}^2}}. \quad (2)$$

В каждой подобласти переходим на более мелкий масштабный уровень и учитываем блочную структуру, схематично представленную на рис. 1а. Структурные блоки породы, представляемые квадратами, разделены трещинными контактами. Количество блоков в подобласти зависит от размеров подобласти и структурного блока. Во всех подобластях количество блоков одинаково. Однако далее, для удобства модельных построений, вместо блоков будем рассматривать квадратные элементы, ограниченные штрих-пунктирными линиями (рис. 1б), которые заключают трещинные контакты внутри себя.

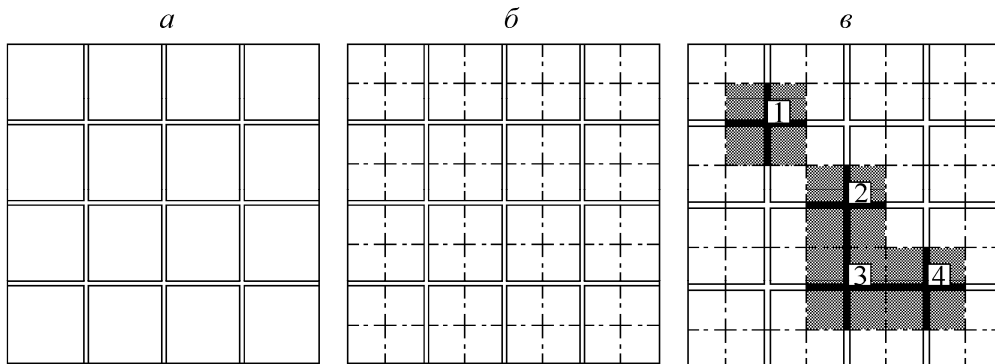


Рис. 1. Схема к учету блочной структуры массива: а — модельная структура ненарушенных трещинных контактов; б — выделение элементов массива, содержащих внутри себя трещинные контакты; в — элементы 1–4 с нарушенными контактами

Нарушение трещинного контакта возможно как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении. Элемент считается нарушенным, если в нем необратимо изменены оба трещинных контакта. Если нарушенные элементы прилегают друг к другу хотя бы одной стороной, то протяженность нарушенного контакта, очевидно, возрастает.

Исходному, условно ненарушенному состоянию элементов соответствует белый цвет контактов. Нарушенное состояние контактов выделено черным цветом (рис. 1в, элементы 1–4), прилегающая часть породы показана серым цветом.

Местоположение нарушенных элементов — случайный фактор. Однако в хаотическом расположении элементов есть свои закономерности, которые исследуются в рамках теории перколяции [5, 6]. 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. На рис. 1в нарушенные элементы 2–4 образуют примитивный кластер из элементов, соприкасающихся по крайней мере одной стороной. В теории перколяции эта схема связи нарушенных элементов отвечает “задаче узлов” на квадратной решетке.

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. Заметим, что в наших исследованиях, 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. Новизна моделирования заключается в выявлении методом статистических испытаний возможных случайных конфигураций нарушенных элементов для совокупности подобластей и в определении вероятности образования интегрального перколяционного кластера. Процедуры построения кластеров нарушенности элементов в подобластях и интегрального перколяционного кластера нарушенности для всей области массива реализованы в виде компьютерной программы.

В процедуре построения кластера нарушенных элементов в подобласти надо задавать отношение нарушенных элементов к их общему числу. Исходим из того, что оценки прочности и степени техногенной нарушенности отражают фактически одну и ту же природу геомеханических изменений в трещинно-блочной среде. Тогда для подобласти логично связать отношение числа нарушенных элементов к их общему числу с вероятностью выполнения прочностного условия для этой подобласти. В качестве приближения эти величины можно связать линейной зависимостью. При этом отсутствие нарушенных элементов отвечает нулевой вероятности выполнения прочностного условия, переход всех элементов в нарушенное состояние соответствует вероятности выполнения прочностного условия, равной единице, а переход половины элементов в нарушенное состояние — вероятности, равной 0.5.

Сделанное допущение является грубым для строгой теоретической оценки количества нарушенных контактов в масштабе подобласти, однако оно конструктивно при сравнении различных условий между собой и в приложениях к задачам с неоднородным распределением техногенных напряжений, когда рассматривается множество контактирующих подобластей. Это допущение позволяет существенно продвинуться вперед в понимании закономерностей общей картины нарушения трещинных контактов для всей исследуемой области блочного массива.

Таким образом, моделирование техногенной нарушенности массива пород включает следующие этапы: 1) постановка задачи о техногенном изменении исходного напряженного состояния массива горных пород и расчет с помощью МКЭ напряженного состояния массива; 2) разбивка исследуемой области массива на подобласти и вычисление в них среднего значения напряжения Мизеса; 3) определение на основе соотношений (1), (2) вероятности выполнения прочностного условия в каждой подобласти и доли нарушенных элементов в них; 4) построение в рамках вероятностного моделирования кластеров техногенной нарушенности, связывающих нарушенные элементы, и определение вероятности образования перколяционного (сквозного) кластера, простирающегося от одной границы исследуемой области до другой; 5) оценка геомеханических и других последствий образования перколяционного кластера.

МОДЕЛЬНЫЙ ПРИМЕР

Некоторые результаты моделирования техногенной нарушенности массива по этой методике приведены ниже. Рассматривалось состояние разделительного целика, отделяющего дно карьера и подземное выработанное пространство для горно-геологических условий, характерных для разработки крутопадающей алмазонасной трубки “Мир”. Ранее при предположении однородности поля напряжений в целике подобная задача решалась в [7].

Здесь в условиях плоской деформации сначала решена модельная задача о техногенном напряженном состоянии массива горных пород в горизонтальном целике, разделяющем дно карьера и подземное выработанное пространство. При этом принимались следующие значения пара-

метров расчета: глубина карьера 500 м, угол наклона бортов 50°, мощность целика, разделяющего дно карьера и подземное выработанное пространство, 40 м, длина целика 200 м; плотность вмещающих пород 2.5 т/м³, прочность на одноосное сжатие образцов пород, слагающих целик, 25 МПа, коэффициент структурного ослабления 0.8 ($\sigma^* = 20$ МПа), характерный размер структурного блока приблизительно 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 α : 0.6; 0.8; 1.0. На поверхности карьера и подземного выработанного пространства граничные напряжения, нормальные к поверхности, приняты равными нулю.

Расчеты напряженного состояния целика выполнялись методом конечных элементов. Обработанные результаты расчетов показаны на рис. 2 для трех значений коэффициента бокового распора. Вследствие симметрии показана только левая часть целика с частью изолиний отношения σ_e / σ^* .

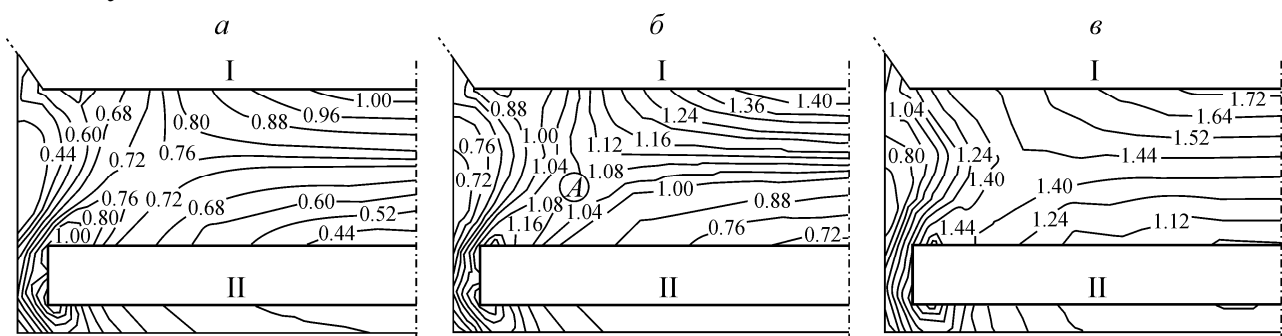


Рис. 2. Изолинии отношения напряжения Мизеса к прочности массива в левой части разделительного целика при коэффициенте бокового распора: *a* — 0.6; *б* — 0.8; *в* — 1.0 (I — дно карьера, II — подземное выработанное пространство)

В рассматриваемом примере область целика (см. рис. 2) разбита на 160 равных подобластей (квадраты с длиной стороны 5 м), для каждой из которых определены усредненные значения эквивалентного напряжения Мизеса. Указанное количество подобластей обусловлено выбором оптимального соотношения между точностью расчетов и объемом вычислений.

Далее проводилось статистическое моделирование. В подобласти эквивалентное напряжение 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 σ^* . 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 σ^*). С помощью соотношений (1), (2) 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 трещинную структуру по схеме рис. 1. 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 класте-

ров в целике для каждого из трех рассматриваемых коэффициентов бокового распора. Некоторые картины нарушенности и конфигурации кластеров показаны на рис. 3–5. (Следует отметить, что при изменении масштаба рисунков для публикации происходит их некоторое искажение.)

Из рис. 3 следует, что при 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 кластера из нарушенных элементов, соединяющего дно карьера и подземное выработанное пространство, пренебрежимо мала.

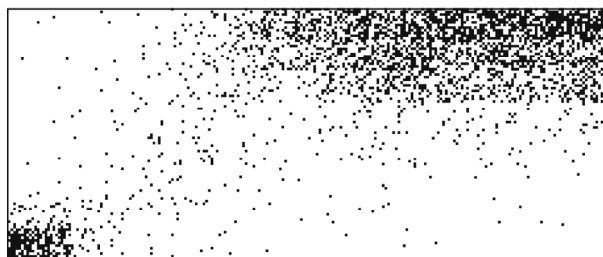


Рис. 3. Возможная картина техногенной нарушенности разделительного целика (левая половина) при коэффициенте бокового распора $\alpha = 0.6$. Черные точки — элементы с нарушенными трещинными контактами

Напротив, при коэффициенте бокового распора, равном единице, техногенно нарушенной оказывается большая часть целика (рис. 4), причем во всех построениях она простирается от верхней границы целика до нижней.



Рис. 4. Возможная картина техногенной нарушенности левой части разделительного целика при $\alpha = 1$. Нарушенные блоки показаны черным цветом

Если коэффициент бокового распора равен 0.8, то при статистическом моделировании картины техногенной нарушенности могут различаться качественно. Например, на рис. 5а показана возможная ситуация, когда образовались отдельные крупные кластеры нарушенности в центральной верхней и нижней крайней части целика, но сквозной кластер отсутствует. На рис. 5б — другая возможная картина наведенной нарушенности, полученная при тех же условиях. Она отражает образование мощного сквозного кластера нарушенности, выделенного одним оттенком серого цвета.

Для статистической оценки вероятности образования сквозного интегрального кластера при условии $\alpha = 0.8$ проведены исследования, в которых определялась вероятность образования сквозного кластера в квадратной локальной области A (см. рис. 2б), расположенной в районе эпюр со значениями 1.04 и 1.08. Эта область включала 16 подобластей и располагалась между границами областей, в которых, согласно предыдущим оценочным построениям, формировались мощные кластеры: в одной области — простирающиеся в центральную верхнюю, в другой — в левую нижнюю часть целика. Для области A осуществлены 30 независимых испытаний (мето-

дом Монте–Карло), по результатам которых установлены математическое ожидание вероятности образования P_{cl} в этой области сквозного кластера и границы доверительного интервала. С надежностью 0.95 искомая вероятность находится в интервале $0.53 < P_{cl} < 0.55$. Таким образом, вероятность образования кластера близка к 0.5, случай $\alpha = 0.8$ отвечает пограничной ситуации в отношении образования сквозного кластера техногенной нарушенности массива пород.

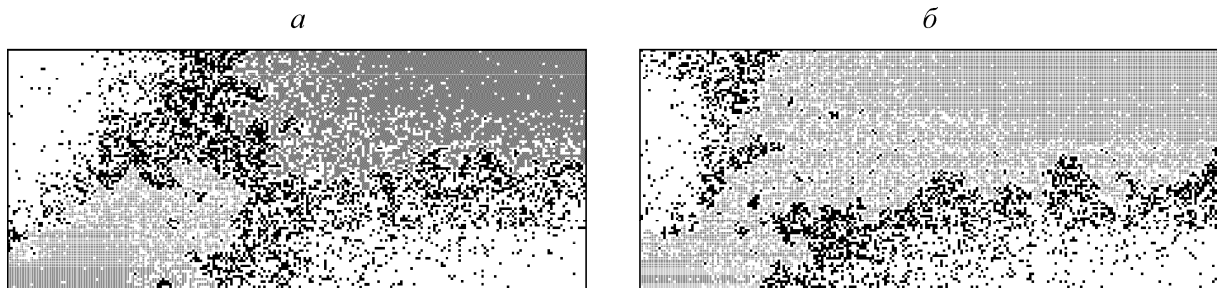


Рис. 5. Возможные картины техногенной нарушенности в левой части целика при коэффициенте бокового распора $\alpha = 0.8$. Нарушенные блоки обозначены черным цветом, наиболее крупные соединения нарушенных блоков — оттенками серого цвета: *a* — отсутствие сквозного кластера, соединяющего верхнюю и нижнюю части целика; *б* — образование сквозного кластера (показан одним оттенком серого цвета)

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как показало моделирование, вероятность образования сквозного кластера наведенной нарушенности в разделительном целике зависит главным образом от особенностей неоднородного техногенного напряженного состояния целика. Допущения, принятые при статистическом моделировании, менее значимы, чем реальные неопределенности, связанные с детерминированным расчетом напряжений: исходным напряженным состоянием массива пород, неоднородностью массива, его реальной геометрией и т. п. Можно заключить, что статистическое моделирование кластеров нарушенности адекватно натуре примерно в той же степени, что и детерминированное моделирование, и целесообразно при сопоставлении ситуаций, происходящих в однотипных условиях. Например, в рассмотренном примере установлено, что техногенная нарушенность целика сильно зависит от исходного горизонтального напряжения массива и случай, когда коэффициент бокового распора равен 0.8, является особенным.

При статистическом моделировании отчетливо проявляются два различных фактора — вероятность образования сквозного кластера и возможная конфигурация кластера. В теории перколяции последний фактор не является важным, однако для практики он имеет большое значение. Конфигурация кластера техногенной нарушенности предопределяет структурные особенности развития в массиве пород природно-техногенных геомеханических процессов.

В первую очередь это касается особенностей развития геопроцессов, связанных с движением флюидов, в частности с просачиванием воды через массив. Активизация природных и возникновение новых техногенных трещин ведет к существенному увеличению водопроницаемости массива горных пород. В трещинно-блочном массиве увеличение проницаемости, очевидно, связано с активизацией природных тектонических трещин, разбивающих массив пород на структурные блоки. Кластер техногенной нарушенности в трещинно-блочном массиве фактически определяет структуру наведенных техногенных каналов для движения воды. Следовательно, статистическое моделирование техногенной нарушенности может использоваться в анализе наведенной проницаемости массива и особенностей просачивания воды через массив.

Из проведенного моделирования следует, что в одних случаях (см. рис. 3) при техногенном воздействии массив хотя и является нарушенным, но не имеет протяженных наведенных каналов, по которым возможно просачивание воды. В других случаях массив пород может быть сильно техногенно нарушен (см. рис. 4), в нем образуются многочисленные, связанные между собой каналы для просачивания воды — фильтрационные каналы. При этом движение воды в массиве пород может быть описано в рамках теории фильтрации.

Однако наиболее интересным и значимым представляется случай, когда картина техногенной нарушенности не является качественно определенной, например когда массив переходит 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). В этой связи главный вывод проведенного моделирования состоит в том, что массив пород, находящийся в состоянии, близком к предельному, даже при небольших геомеханических возмущениях может скачкообразно изменить свою интегральную проницаемость вследствие соединения отдельных кластеров в мощный перколяционный кластер.

ВЫВОДЫ

Явления скачкообразного изменения состояния массива (фазовые переходы в массиве) почти всегда представляют опасность (горные удары, выбросы и т. п.) и становятся объектом специальных исследований. В рассматриваемом случае скачкообразное изменение режима просачивания в теории перколяции определяется как геометрический фазовый переход.

На практике неожиданное резкое изменение режима просачивания воды может иметь катастрофические последствия. Исследования, подобные изложенным, могут иметь значение в связи с количественной оценкой риска катастрофических последствий, возникающих при предельных состояниях напряженного массива пород, особенно в случаях, когда достоверно неизвестны природные горизонтальные напряжения в массиве. Для анализа риска опасного взаимодействия природно-техногенных гидрогеологических и геомеханических процессов целесообразно проводить комплексное моделирование, которое включает как детерминированные, так и вероятностные модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Горные науки.** Освоение и сохранение недр Земли / под ред. акад. К. Н Трубецкого. — М.: Изд-во Академии горных наук, 1997.
2. **Болотин В. В.** Статистические методы в строительной механике. — М.: Изд-во литературы по строительству, 1965.
3. **Рекомендации** по определению механических свойств трещиноватого массива. — СПб.: ВНИМИ, 1992.
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. **Челидзе Т. Л.** Методы теории протекания в механике геоматериалов. — М.: Наука, 1987.
7. **Трубецкой К. Н., Милетенко И. В., Милетенко Н. А., Одинцев В. Н.** Аналитическая оценка техногенной нарушенности предохранительного целика / Проблемы отработки алмазоносного месторождения трубки “Мир” под толщей метегеро-ичерского водоносного комплекса. — М.: ИПКОН РАН, 2012.

Поступила в редакцию 22/VII 2013