

УДК 624.153.7

**КОНТИНУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ЗЕРНИСТОЙ СРЕДЫ  
В ЗАДАЧЕ ОБ ОТСЛАИВАНИИ И ЗОНАЛЬНОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ  
МАССИВА ПОРОД ВОКРУГ ВЫРАБОТКИ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ**

**Ван Ксю-бин, Пан И-Шан, Ву Ксиао-линь**

*Ляонинский технический университет, E-mail: panyish\_cn@sina.com,  
Фуксин 123000, Китай*

Предлагается упрощенная модель горной породы, состоящей из совокупности упругих зерен, необратимая деформация которой происходит на контактах зерен. Применение модели в численных расчетах показало наличие высоких сжимающих тангенциальных напряжений вокруг выработки, формирующих кольцевую структуру. Для зерен малого диаметра структура подобна процессам отслаивания, для более крупных зерен ее можно сравнить с зональной дезинтеграцией.

*Зональная дезинтеграция, отслаивание, самоорганизация, зона сдвига, выработка, зерно, поверхность контакта, матрица, доминирующие микроструктуры*

**ВВЕДЕНИЕ**

Несмотря на то что выработки с круглым сечением представляются довольно простыми с точки зрения геометрии сооружениями, разрушение массива вокруг них порождает множество разнообразных картин: в натуральных наблюдениях [1–3] регистрируются разрушения с четырьмя симметрично расположенными выколами в виде треугольников (V-образные выемки) (такой вид разрушения происходит при гидростатическом сжатии), в других случаях выколы располагаются на диаметрально противоположных сторонах тоннеля [1–7] (такой вид разрушения отмечен при негидростатическом нагружении). Породы в разрушенных областях испытывают высокое давление с развитием трещин сдвига и/или отрыва. Трещины отрыва развиваются обычно параллельно контуру выработки и приводят к формированию тонкого отслоения [6, 7]. При отсутствии крепи и сцепления области отслаивания обрушаются. Тонкие отслаивания порядка 1–5 см образуются при сдвиге, расколе, короблении [6, 7]. Зональная периодическая структура, т. е. чередование зон разрушения (трещиноватости) и упругих (или ненарушенных) участков установлена во вмещающем выработку породном массиве на большой глубине [8–14]. Это явление подтвердили многие исследователи полевыми результатами разведки с помощью геофизических методов или перископа, а также результатами аналитического и численного анализа [10, 15–19].

Работа выполнена при поддержке Китайского национального фонда наук о Земле, проект № 2010СВ226803, и Программы поддержки талантов Ляонинского технического университета, проект № LJQ2011030.

Вполне очевидно, что традиционные численные и теоретические методы без модификаций не способны эффективно моделировать локальные явления разрушения. Для численного или аналитического прогноза смещений или зон трещиноватости вокруг круглой выработки в условиях плоской деформации исследователи рассмотрели множество факторов: нелинейное смещение, постпиковое ослабление или упрочнение, гетерогенность, неклассические конструктивные модели [6–7, 10, 15, 17–30]. Эти исследования способствуют лучшему пониманию основ механической реакции вмещающего породного массива после проходки выработки. Результаты интенсивных исследований позволяют сделать вывод, что континуальные модели, рассматривающие постпиковое ослабление, упрочнение или абсолютную хрупкость, и дискретные модели вполне пригодны для моделирования V-образных выколов [6–7, 20–22]. Однако отслаивание, вызванное разрывными трещинами с небольшим интервалом в условиях высокого сжимающего давления, не может быть репродуцировано в виде разрывов. Явления отслаивания и скола могут наблюдаться не только в местах разрывов, но и в любом месте вблизи поверхности выработки. Возможно, этот вид разрушения вмещающего выработку породного массива следует рассматривать как вид зонального разрушения. В [19] утверждается, что кольцевые зоны разрушения формируются в результате расслаивания, что подчеркивает их динамический характер. Очевидно, что при достаточно большом интервале между разрывными трещинами отслаивание породы аналогично зональной дезинтеграции. Следовательно, необходимо выполнить численное моделирование петлеобразных трещин или зон разрушения с практически одинаковыми интервалами в породном массиве, вмещающем выработку.

В данной работе с помощью модели “зерно – поверхность контакта – матрица”, выполненной в программе FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua), изучено поведение вмещающего круглую выработку породного массива после ее проходки. Рассмотрено влияние коэффициента поперечного удерживающего усилия и радиуса зерен. Проведено сравнение данной модели с классической континуальной гомогенной моделью. Осуществлено моделирование трех основных режимов разрушения: отслаивания, зональной дезинтеграции и сети линий скольжения. Предложен общий механизм отслаивания и зональной дезинтеграции. Различие между этими двумя процессами связано с масштабом микроструктур, доминирующих в процессе самоорганизации.

#### **ОСНОВЫ МОДЕЛИ “ЗЕРНО – ПОВЕРХНОСТЬ КОНТАКТА – МАТРИЦА”**

Горная порода упрощена до материала, состоящего из трех компонентов: зерна, поверхности контакта, матрицы. Зерна интенсивно уплотняют перед циклом нагружения. В [23–25] дано детальное описание алгоритма уплотнения применительно к естественному гравитационному уплотнению дискретных зерен. На рис. 1 показана схема уплотнения. При контакте двух зерен предполагается наличие тонкой прямоугольной контактной поверхности между ними. Параметры поверхности контакта: длину, ширину и угол — определяют по радиусу и центральным точкам двух зерен [23–25]. Во время нагружения расположение зерен не изменяется, включая контактную поверхность, в отличие от метода дискретного элемента. В целом данная модель “зерно – поверхность контакта – матрица” является континуальной и гетерогенной.

Принимается гипотеза — зерна всегда остаются упругими. Это предположение обычно применяют для моделирования неразрушающихся компонентов горной породы, например зерен песка в песчанике или небольших блоков породы, разделенных трещинами. Форма зерен

круглая. Поверхность контакта используют для моделирования сложного контактного поведения между зернами при сдвиге, сжатии или растяжении. Балансный материал, помимо зерен и контактной поверхности, является матрицей, моделирующей связывающий материал относительно малой прочности при наличии фрагментов породы, трещин и пор.

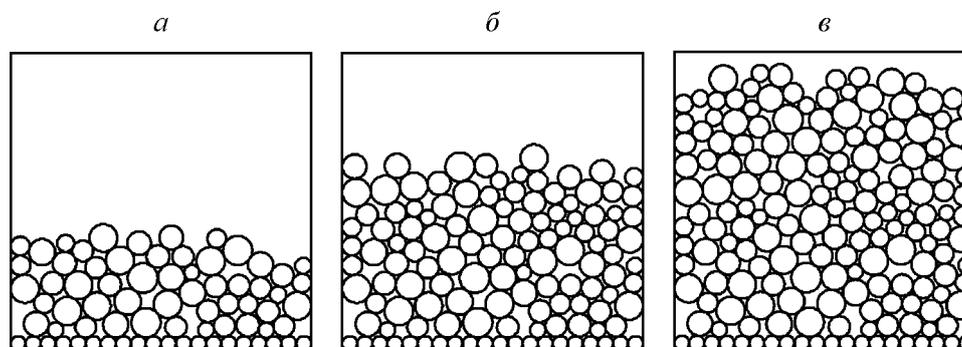


Рис. 1. Схема процесса гравитационного уплотнения зерен

Зерна моделировались двухконстантным законом Гука с упругим модулем, равным 26.52 ГПа, коэффициентом Пуассона — 0.21. Критерий Кулона–Мора взят как критерий разрушения, при котором сцепление и внутренний угол трения не изменяются с ростом деформации пластического сдвига. Известно, что данный критерий может дать завышенные значения предела прочности на разрыв для горной породы, поэтому необходимо ввести предел на растяжение. Для контактной поверхности сцепление 2 МПа, внутренний фрикционный угол  $30^\circ$ , а прочность на разрыв 1 МПа. Для матрицы параметры прочности ниже на 25 % соответствующих значений для контактной поверхности. Коэффициент Пуассона остается неизменным.

В настоящей работе выполнен численный расчет восьми схем (таблица). Каждая модель размером  $1 \times 1$  м разделена на  $500 \times 500$  прямоугольных элементов размером  $0.002 \times 0.002$  м. Для сравнения с моделью “зерно–поверхность контакта–матрица” схема № 8 рассчитана для гомогенной модели под гидростатическим давлением 3 МПа, при этом ее параметры прочности равны параметрам прочности элементов на поверхности контакта в гетерогенных моделях. На рис. 2 черные, серые и белые элементы — контактные поверхности, зерна и матрица соответственно. Перед нагружением каждая модель была без круглой выемки в середине. Выемка сделана во второй стадии расчетов. Для первых трех моделей компрессионное давление 3 МПа приложено с четырех сторон. Однако каждая модель имела свой средний радиус зерен в соответствии с равномерным случайным распределением (рис. 3). На схемах 4, 6 и 5, 7 модели испытывали негидростатическое давление с коэффициентом бокового давления 0.5 и 1.5 соответственно. Во всех схемах на верхней поверхности и основании каждой модели сжимающее давление составляло 3 МПа.

На схемах 1–3 до проходки выработки число зерен равно 4547, 2329 и 1197 соответственно, число зерен в моделируемых элементах — 166 151, 179 963 и 187 797, а число поверхностей контакта — 43 087, 26 190 и 15 826. Для остальных элементов, моделирующих матрицу, число в каждой схеме можно легко вычислить на основании числа двух других типов элементов и суммарного числа ( $500 \times 500$ ). В схемах 1–3 соотношение площади матрицы составляет 16.3, 17.5 и 18.6 % соответственно.

Схемы расчета и их параметры

Схема	Минимальный диаметр зерен, м	Максимальный диаметр зерен, м	Коэффициент бокового горного давления
1	0.0125	0.0175	1
2	0.0175	0.0245	1
3	0.0245	0.0343	1
4	0.0125	0.0175	0.5
5	0.0125	0.0175	1.5
6	0.0245	0.0343	0.5
7	0.0245	0.0343	1.5
8	Нет зерен в гомогенной модели		1

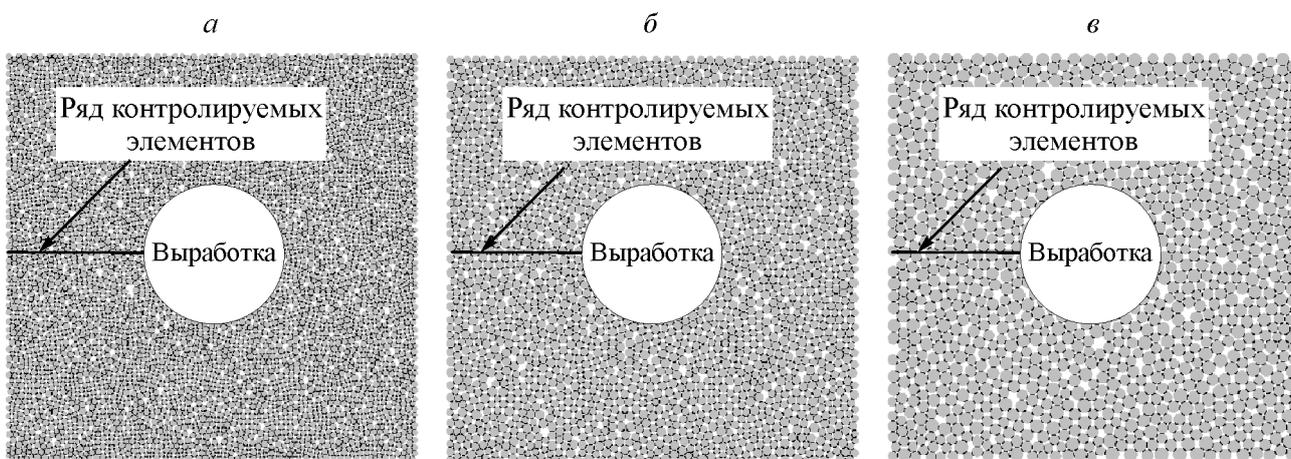


Рис. 2. Модели “зерно – поверхность контакта – матрица” разного радиуса: *a* — схемы 1, 4 и 5; *б* — схема 2; *в* — схемы 3, 6, и 7

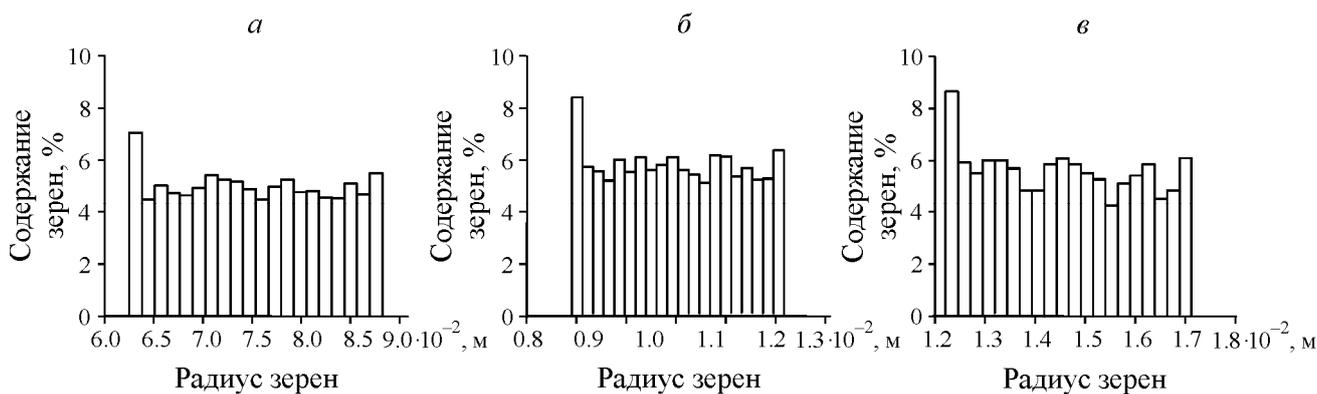


Рис. 3. Распределение радиусов зерен согласно системе равномерного случайного распределения: *a* — схемы 1, 4 и 5; *б* — схема 2; *в* — схемы 3, 6 и 7

Численные расчеты для плоской деформации выполнены в три стадии:

— сначала создают напряжение в элементах каждой модели в условиях плоской деформации, затем напряжение внешнего сжатия прикладывают к четырем сторонам модели. Если максимальное несбалансированное усилие в элементах не менее 0.05 Н, полагают, что модель достигла состояния статического равновесия;

— далее моделируют образование выработки радиусом 0.025 м с помощью встроенной программы FLAC, FISH. Все элементы в выемке круглого сечения убирают, с тем чтобы некоторые зерна и поверхности контакта можно было разделить на две части (на практике это сделать невозможно). Это простое в реализации упрощение не оказывает существенного влияния на результаты расчетов;

— расчеты возобновляют для каждой модели с выемкой до 30 000 стадий. Этого достаточно для достижения состояния статического равновесия всех моделей.

### ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 4–7 представлены поля деформации сдвига, минимального главного напряжения при сжатии  $\sigma_1$  и максимального главного напряжения при растяжении  $\sigma_3 > \sigma_1$  при различных временных шагах. Необходимо отметить, что напряжения сжатия в программе FLAC — отрицательная величина, а напряжения растяжения — положительная. Вблизи поверхности выработки три упомянутых величины могут достичь экстремально высоких значений. Для четкой демонстрации их распределения в значительной части вмещающего породного массива элементы, подверженные повышенной деформации сдвига (выше  $3 \times 10^{-4}$ ), повышенному компрессионному напряжению ( $\sigma_1 < -8$  МПа) и повышенному растягивающему напряжению ( $\sigma_3 > 0.8$  МПа), представлены в белом цвете. Для других элементов серые цвета обозначают три типа этих величин — чем темнее цвет, тем выше их значение.

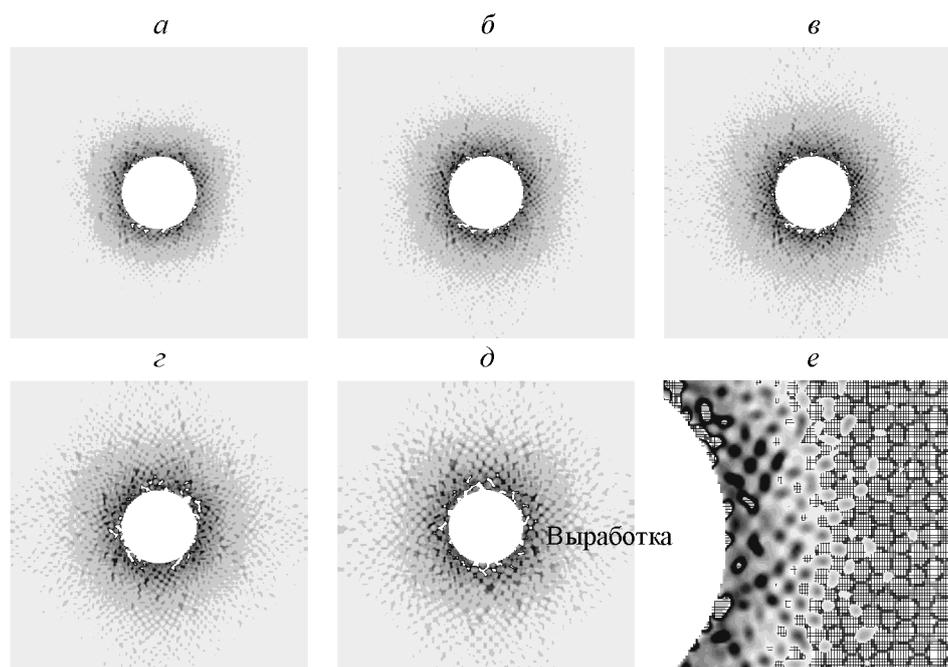


Рис. 4. Распределение деформации сдвига в схемах 1–3: *a–в, e* — схема 1 и временной шаг 5000, 10 000, 30 000, 30 000 соответственно; *г* — схема 2 после образования выработки и временной шаг 30 000; *д* — схема 3 и временной шаг 30 000

На рис. 7*n–n* максимальные значения инкремента деформации сдвига, минимальное главное напряжение при сжатии и максимальное главное напряжение при растяжении достигают  $1.55 \times 10^{-4}$ , 6.55 и 0.144 МПа соответственно. Более темный цвет обозначает более высокое их значение.

На рис. 4–6е показаны высокие значения деформаций и напряжений, а также подробные микроструктуры с расположением зерен, поверхностей контакта и матрицы. Контурные карты накладываются на микроструктуры. Вблизи поверхности выработки находятся элементы с экстремально высокими напряжениями и деформациями. На расстоянии от поверхности можно увидеть различные элементы с минимально низкими значениями напряжений и деформаций. Элементы белого, черного и серого цвета принадлежат соответственно зернам, поверхности контакта и матрице.

Как видно на рис. 4, участки повышенной деформации характеризуются более узкими и более искривленными зонами, известными как зоны локализации сдвига или зоны сдвига. Серия пересекающихся многочисленных зон сдвига образует сетевую структуру. Эти зоны зарождаются на поверхности выработки и развиваются в глубь вмещающего породного массива с ростом временного шага до момента формирования неизменяемой структуры. В зоне сдвига деформация обычно уменьшается относительно радиального расстояния от стенки выработки до полного исчезновения. Вблизи четырех сторон модели выработка не оказывает существенного влияния на деформации сдвига. Изогнутые зоны сдвига могут иметь сопряженные сетевые структуры по часовой и против часовой стрелки. Зоны сдвига все теснее примыкают к поверхности выработки подобно логарифмическим спиральным линиям скольжения. Вероятно, часть из них, например номер 6, может разделить вмещающий выработку породный массив на шесть участков приблизительно треугольной формы, блоки так называемой алмазоподобной формы [26–30]. Теоретические и численные исследования посвящены изучению этого особого вида породных структур. Зоны сдвига примерно равной длины способствуют формированию мощной кольцевой зоны вокруг выработки. Это мощное кольцо с высокой концентрацией деформации сдвига похоже на кольцевую упругую зону вокруг отверстия в упругопластической механике. Однако в различных положениях, особенно в петлеобразном направлении, распределение деформации сдвига характеризуется как неравномерное из-за наличия зон сдвига. С ростом временного шага радиус кольца увеличивается, поскольку зоны сдвига постоянно расширяются в условиях отсутствия состояния равновесия до момента, пока количество временных шагов не достигнет определенного высокого значения.

Траектории расширения зон сдвига иллюстрирует рис. 4е. Видно, что максимальная деформация сдвига формируется в матрице по границе выработки, видимо, за счет меньшей прочности элементов матрицы. Итак, высокая деформация сдвига может развиваться и аккумулироваться по границе выработки. На расстоянии от поверхности выработки высокие деформации сдвига зарегистрированы как в матрице, так и на поверхностях контакта, а самые низкие — в зернах. Помимо этих позиций, высокая деформация сдвига характерна только для матрицы.

Числовые значения поля деформации сдвига (см. рис. 4) находятся в хорошем соответствии с экспериментальными результатами для известняка месторождения Кордова Крим по разрушению при сдвиге [3]. В этом типе породы зерна несколько прочнее цементирующего материала и исключают возможность прохождения трещин сквозь них по линии меньшего сопротивления. Образующиеся трещины, вынужденные распространяться в интергранулярном пространстве по кривой, являются причиной сдвигового разрушения. В граните вся масса представлена произвольно распределенными связанными кристаллами материала с подобными свойствами и трещины распространяются интрагранулярно.

На рис. 5 узкие участки повышенных минимальных главных напряжений в условиях сжатия формируют кольца вокруг выработки, которая разделена на узкие участки низких минимальных главных напряжений в условиях сжатия. Чем меньше расстояние от поверхности выработки, тем выше их величина. В случае с зернами меньшей крупности, интервалы между кольцами уменьшаются и становятся трудноразличимыми. Чем дальше от поверхности выработки, тем больше интервал между кольцами. Установлено, что повышенные значения минимальных главных напряжений при сжатии формируются в зернах, которые сохраняют свою упругость. Так, несколько зерен можно сжать вместе и образовать кольцо в петлеобразном направлении во вмещающей породе за счет самоорганизации взаимодействующих зерен.

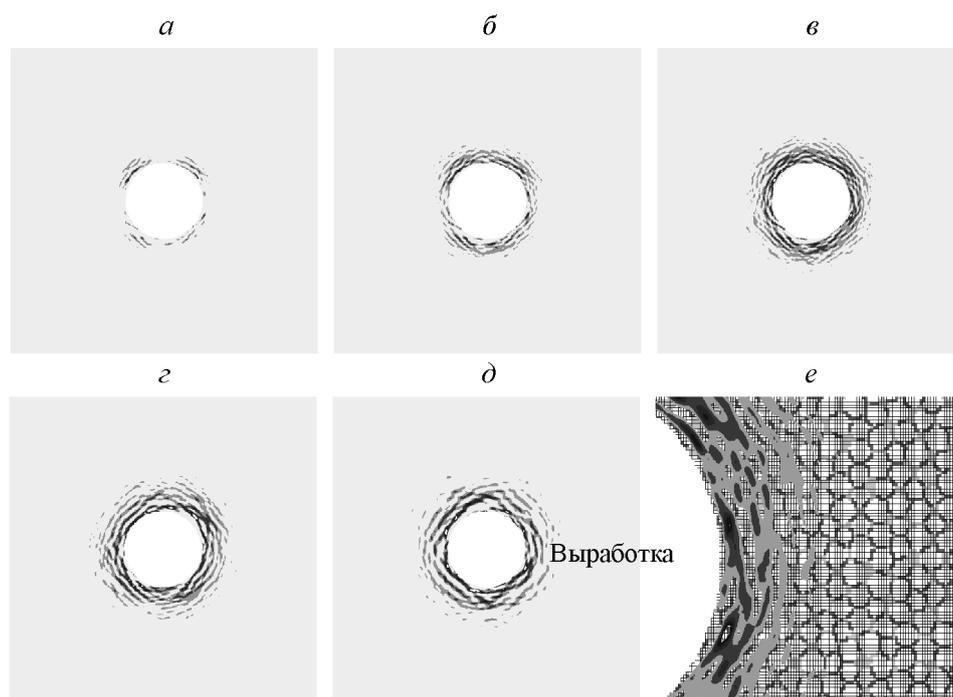


Рис. 5. Распределение минимального главного напряжения на схемах 1–3: *a–в, e* — схема 1 и временной шаг 5000, 10 000, 30 000, 30 000 соответственно после выемки тоннеля (выработки); *г* — схема 2 и временной шаг 30 000; *д* — схема 3 и временной шаг 30 000

При высоких сжимающих напряжениях в петлеобразном направлении вполне обоснованной становится ортогональность направления расщепления к растягивающим напряжениям, что приводит к отслаиванию и скалыванию. На рис. 6 высокие максимальные главные напряжения при растяжении направлены радиально вокруг поверхности выработки. Видимо, за счет того, что зерна испытывают сложные деформации и смещения под действием высоких сжимающих напряжений в петлеобразном направлении, возникают определенные растягивающие нагрузки. Последние могут спровоцировать формирование расщепляющих трещин, параллельных стенке выработки или тоннеля, в случае игнорирования эффекта высокосжимающих напряжений в петлеобразном направлении. Все эти явления не могут быть представлены на основе классической однородной континуальной модели. Установлено, что в условиях гидростатического давления 3 МПа (см. рис. 7*n–n*) деформация сдвига и минимальное главное напряжение

монотонно снижаются с увеличением расстояния от контура выработки после разрушения нескольких элементов на ее стене, а растягивающие нагрузки в радиальном направлении отсутствуют. Наличие малой растягивающей нагрузки объясняется низкой сглаженностью внешнего контура выработки. Если заданные параметры прочности в однородной модели геосреды идентичны параметрам для соответствующих элементов в матрице, то все структурные элементы во вмещающем породном массиве будут разрушены. На основе структурных моделей породного массива с трещинами и нарушениями [31–32] установлено, что растягивающие напряжения формируются при нагружении на нарушенных участках и параллельны направлению разгрузки, т. е. радиально к круглой выработке в породном массиве. В данной работе в расчетах для условий проходки выработки или ее разгрузки не предполагается наличие нарушений массива, но рассмотрено три вида его неоднородностей.

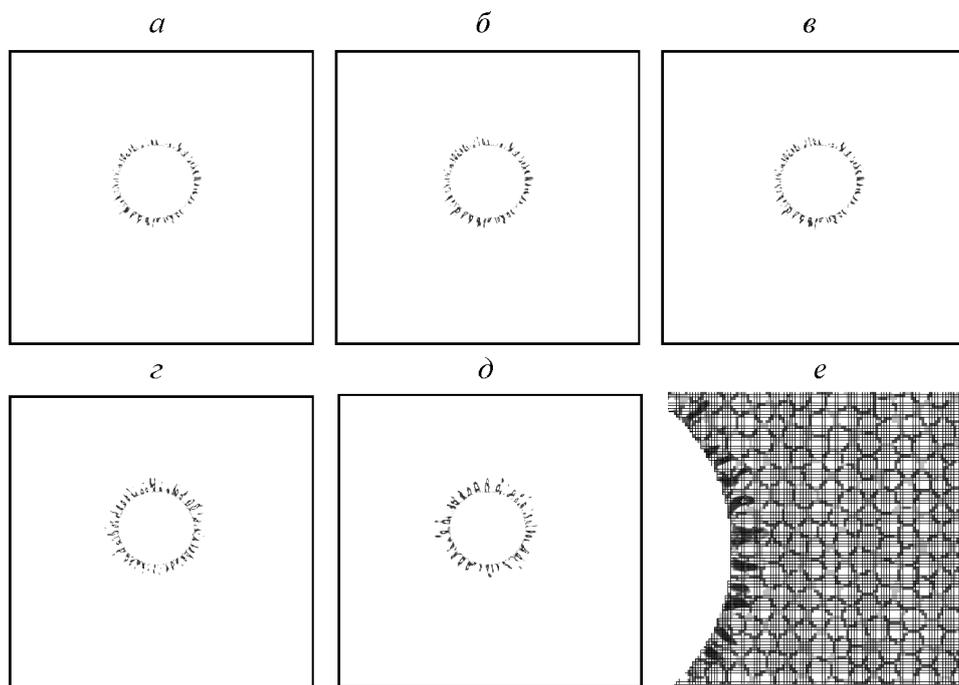


Рис. 6. Распределение максимального главного напряжения в условиях растяжения на схемах 1–3: *a–в, е* — схема 1 и временной шаг 5000, 10 000, 30 000, 30 000 соответственно после образования тоннеля; *г* — схема 2 и временной шаг 30 000; *д* — схема 3 и временной шаг 30 000

Согласно рис. 7*a–б, г–д, ж–з, к–л* для случаев негидростатического давления выявлено наличие высоких деформаций сдвига и минимальных значений главных напряжений при сжатии вблизи поверхности выработки с формированием двух треугольных участков концентрации высокого напряжения и деформации. На этих участках обнаружены пересекающиеся многочисленные зоны сдвига, ориентированные под углом к основному направлению, и высокие сжимающие напряжения в близком к петлеобразному направлении. В зависимости от свойств вмещающего массива на этих участках выработка (тоннель) будет иметь овальную или эллиптическую форму [1–7]. На рис. 7*в, е, и, м* видно, что влияние коэффициента бокового удерживающего усилия на распределение максимальных главных напряжений при растяжении незначительно.

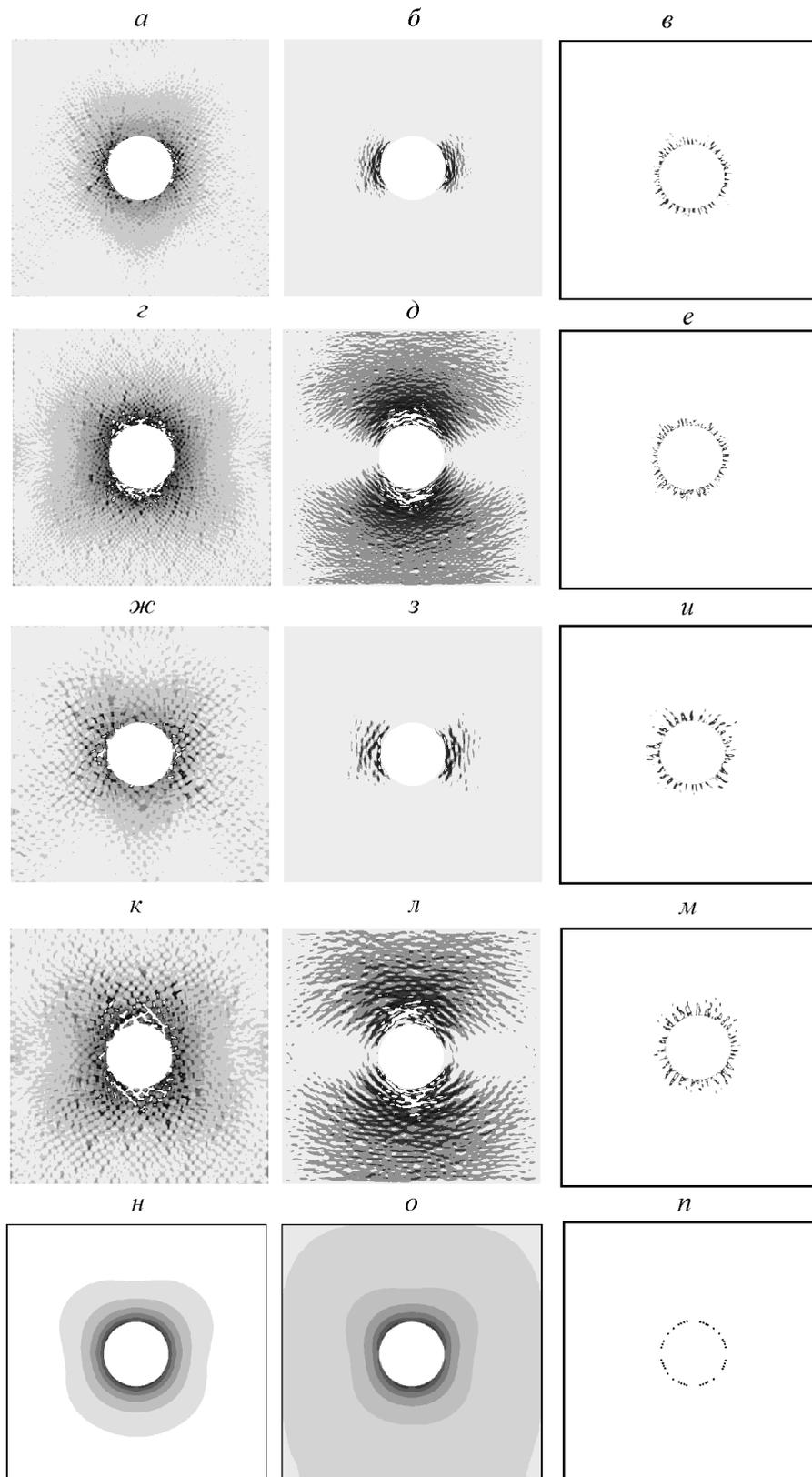


Рис. 7. Влияние коэффициента бокового отпора на распределение максимальных главных напряжений в схемах нагружения 4–8 (временной шаг 30 000): *а, г, ж, к, н* — деформация сдвига; *б, д, з, л, о* — минимальное главное давление при сжатии; *в, е, и, м, п* — максимальное главное напряжение при растяжении; *а–в, г–е, ж–и, к–м, н–п* — для схем 4–8 соответственно

На рис. 8 представлены диаграммы изменений деформаций сдвига, минимального и максимального главных напряжений в зависимости от расстояния до выработки для схемы 1. Эти диаграммы следует понимать так: чем больше значение абсциссы (число контролируемых элементов), тем ближе находимся к контуру выработки. На каждой из диаграмм имеются три однотипные кривые, отвечающие разным временным шагам. Кроме того, для каждой из анализируемых величин показано, для какого из элементов системы данная величина максимальна (минимальна). Так, например, для деформации сдвига повышенные значения отмечаются для элементов зерен, далее следуют элементы поверхности контакта, самые низкие значения деформаций сдвига имеют элементы матрицы. Для максимального главного напряжения (рис. 8в) наибольшие значения получаются для элементов зерен, далее следуют элементы поверхности контакта и замыкают тройку элементы матрицы.

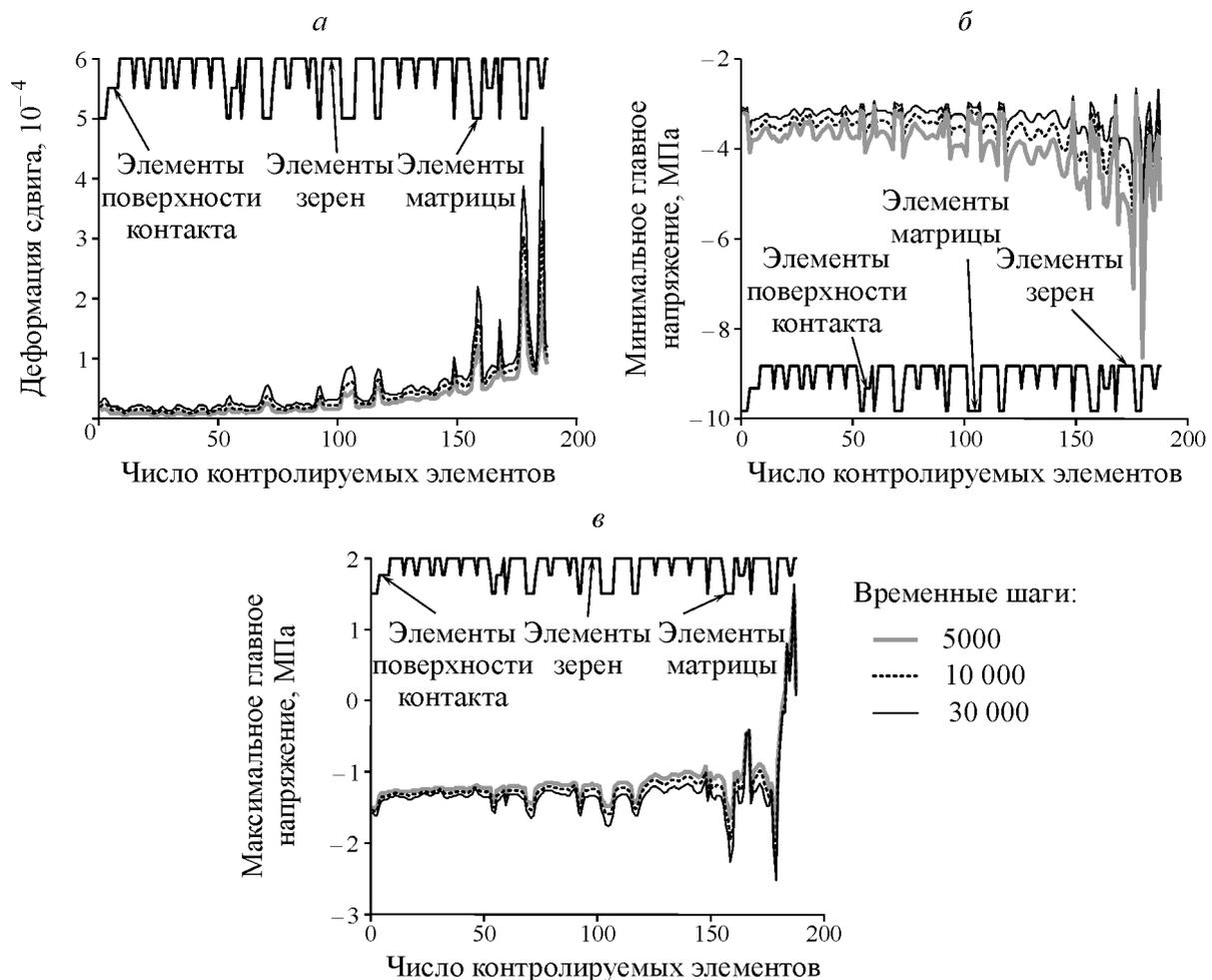


Рис. 8. Распределение трех видов величин в ряду контролируемых элементов для схемы 1

### УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ ОТСЛАИВАНИЯ ПОРОД И ЭФФЕКТ ЗОНАЛЬНОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ

Наличие крупных зерен (см. рис. 5, 7) обуславливает меньшее количество зон сдвига и соответственно кольцевых зон повышенных напряжений. Помимо этого, при бóльших радиусах зерен зоны сдвига и кольцевые зоны становятся шире, а глубина их формирования больше.

Также увеличивается размер кольцевой зоны с неравномерными напряжениями и деформациями в петлеобразном и радиальном направлениях вокруг выработки, которую обычно называют упругой зоной или приконтурной зоной трещиноватости вокруг выработки.

Численные результаты, полученные для крупных зерен, указывают на возникновение зональной дезинтеграции горных пород на больших глубинах, а для мелких зерен — соответственно на процесс отслаивания. В данной работе предлагается универсальный механизм для этих двух явлений, которые могут зарождаться и развиваться в породном массиве, содержащем микроstructures на уровне зерен или геоблоков, в зависимости от типа пород и уровня внешнего давления. Микроstructures, разделенные или окруженные слабыми компонентами в виде связывающих материалов или трещин, могут быть кластеризованы в кольцевую структуру в результате внешнего механического воздействия, в процессе самоорганизации породного массива. В механически неуравновешенной системе процессы самоорганизации породного массива универсальны и имеются на каждом иерархическом уровне [12–13]. Напряжения внутри микроstructures, достигшие определенного уровня, могут вызывать такие явления, как скалывание или разрушение при сдвиге. Так, во вмещающем породном массиве зона разрушения будет сформирована вблизи проходки выработки. При достаточно высоких напряжениях, перераспределенных в процессе проходки выработки, формируется большая зона напряжений с несколькими перемежающимися участками разрушений и неразрушений с наведенной системой параллельных трещин, напоминающих свод давления, испытывающий нагрузку сдвига в процессе выемки тоннеля (выработки).

Следует отметить, что предложенный механизм разрушения горных пород подчеркивает большую значимость доминирующих микроstructures в породном массиве и самоорганизации в масштабе доминирующих микроstructures. Выдвинуты значимые предположения для объяснения явления зональной дезинтеграции горных пород, например в виде постоянного формирования так называемых ложных контуров вокруг горных выработок [10] или трансформации линий пластического сдвигового скольжения в кольцеобразную форму при определенных ограничениях [16]. В данных исследованиях еще не использовались “неклассические” теории упругости со сложными математическими описаниями [15–19]. По-видимому, достаточно использовать классическую упругопластическую теорию, учитывающую структурные свойства геовещества [36]. Вероятно, существует и общая связь между представленной авторами моделью “зерно – поверхность контакта – матрица” и упомянутыми неклассическими теориями, вводящими понятие несовместности деформации породы и/или взаимодействия микроstructures [36]. Тем не менее данная модель позволяет совместно рассматривать эти сложные процессы, с трудом поддающиеся математическому описанию, путем учета взаимодействия между контактирующими зернами в результате внешнего воздействия. Причиной перемещения зерен может быть неравновесное состояние породного массива, приводящее к несовместности деформаций из-за наличия трещин в породном массиве [36]. Соответственно в трещиноватом породном массиве взаимодействие блоков пород может приводить к нарушению совместности деформаций на берегах трещин.

В отличие от однородной континуальной модели механики сплошных сред, данная модель описывает взаимодействие между зернами или микроstructures, действительно отвечающих за механизм зональной дезинтеграции и отслоений в массиве пород. При развитии интенсивной трещиноватости реальные зерна в породном блоке не являются доминирующими микро-

структурами в сравнении с породным блоком, поэтому следует ожидать появления трещин разрыва с большими интервалами между ними в петлеобразном направлении, т. е. зональную дезинтеграцию. При отсутствии трещиноватости в породе реальные зерна можно рассматривать как главные микроструктуры, индуцирующие процесс расслоения. В работе [6] отмечено, что трещиноватость горных пород с зернистой структурой после горных ударов вокруг выработок приобретает вид, наблюдаемый при дисковании зерна. И это не противоречит выводам нашей статьи. Зональная дезинтеграция горных пород на большой глубине позволяет заключить, что повышенное горное давление вызывает интенсивное трещинообразование в породном массиве, а процесс отслаивания пород обычно наблюдается в твердых нетронутых породах.

При изучении механизма явления зональной дезинтеграции горных пород отмечена особая роль трещин, возникающих на большой глубине [11, 14, 26–29]. Наличие трещин обуславливает также эффект знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия и возникновение волн маятникового типа [33–35]. В работе [11] сделано заключение о необходимости специальных измерений при изучении структуры породных массивов с интенсивной и средней трещиноватостью. Рассматривая параллельные трещины и семейство трещин в такой модели, авторы использовали теорию коэффициента плотности энергии деформации для изучения зональной дезинтеграции [14].

В данной модели уровень горного давления недостаточно высок на каждой из четырех сторон; размеры выработки и модель малы по сравнению с реальными размерами, тогда как размеры зерен на самом деле недостаточно малы, чтобы сократить время расчета; параметры прочности элементов на поверхности контакта и в матрице также малы. Если повысить параметры прочности, модель горной выработки (тоннеля) может достигнуть условия равновесия даже при приложении высоких компрессионных напряжений к четырем ее сторонам. В рассматриваемой модели зерна в некоторой степени аналогичны структурным блокам в трещиноватых породных массивах, а поверхности контакта и используемая нами матрица приблизительно эквивалентны трещинам отдельности. В настоящее время становится очевидной значимость наличия и разработки новых методов аппроксимации реального трещиноватого породного массива относительно идеальной зернистой системы [37]. Эта проблема, безусловно, должна стать в центре внимания для специальных исследований. Представленные результаты исследований являются пока в известной мере качественными и схематичными.

## **ВЫВОДЫ**

1. С помощью континуальной модели “зерно–поверхность контакта–матрица” изучено распределение деформации сдвига, максимального и минимального главных компонент тензора напряжений после проходки в породном массиве выработки (тоннеля) круглого сечения. Поле деформации сдвига образовано изогнутыми линиями скольжения. Поле минимального главного напряжения представляет несколько сильно сжатых колец вокруг поверхности выработки.

2. На основе численных результатов для различных по радиусам зерен разработан универсальный механизм процессов отслаивания и зональной дезинтеграции в массиве горных пород. Тем не менее масштабы взаимодействующих микроструктур, относящихся или даже управляющих процессом самоорганизации в породном массиве, различны. В твердых породах без трещиноватости интенсивное параллельное скалывание может происходить вблизи поверхности выработки в результате взаимодействия реальных зерен.

3. В предложенной континуальной механической модели можно рассматривать взаимодействие зерен как структурных характеристик или элементов разного типа, без введения сложных моделей упругого состояния. Упрощение реальной проблемы механики горных пород до уровня модели “зерно – поверхность контакта – матрица” — предмет перспективных фундаментальных исследований в будущем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lu Y., Wang C. M.** Study on back analysis for stress of rock mass from information of rockbursts, Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1994, 11, No. 3.
2. **Ortlepp W. D., Stacey T. R.** Rockburst mechanisms in tunnels and shafts, Tunnelling and Underground Space Technology, 1994, 9, No. 1.
3. **Haimson B. C., Song I.** Laboratory study of borehole breakouts in Cordova Cream: a case of shear failure mechanism, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1993, 30, No. 7.
4. **Santarelli F. J., Brown E. T.** Failure of three sedimentary rocks in triaxial and hollow cylinder compression tests, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1989, 26, No. 5.
5. **Ewy R. T., Cook N. G. W.** Deformation and fracture around cylindrical openings in rock — II. Initiation, growth and interaction of fractures, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1990, 27, No. 5.
6. **Martin C. D.** The effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength, Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34, No. 5.
7. **Read R. S.** 20 years of excavation response studies at AECL’s Underground Research Laboratory, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41, No. 8.
8. **Shemyakin E. I., Fisenko G. N., Kurlenya M. V., Oparin V. N., et al.** Zonal disintegration of rocks around underground workings. Part I: Data of in situ observations, Soviet Mining Science, 1986, 22, No. 3.
9. **Shemyakin E. I., Fisenko G. N., Kurlenya M. V., Oparin V. N., et al.** Zonal disintegration of rocks around underground workings. Part II: Fracturing of rocks on models of equivalent materials, Soviet Mining Science, 1986, 22, No. 4.
10. **Shemyakin E. I., Fisenko G. N., Kurlenya M. V., Oparin V. N., et al.** Zonal disintegration of rocks around underground mines. Part III: Theoretical concepts, Soviet Mining Science, 1987, 23, No. 1.
11. **Shemyakin E. I., Oparin V. N., Kurlenya M. V., Reva V. N., et al.** Zonal disintegration of rocks around underground workings. Part IV: Practical applications, Soviet Mining Science, 1989, 25, No. 4.
12. **Oparin V. N.** Nonlinear mechanics properties in deep mining, Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2009, 28, No. 5.
13. **Oparin V. N.** Discrete properties of entities of a geomedium and their canonical representation, Journal of Mining Science, 2007, 43, No. 3.
14. **Li S. C., H. Wang F. H., Qian Q. H., et al.** In-situ monitoring research on zonal disintegration of surrounding rock mass in deep mine roadways, Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27, No. 8.
15. **Zhou X. P., Wang F. H., Qian Q. H., et al.** Zonal fracturing mechanism in deep crack-weakened rock masses, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2008, 50, No. 1.
16. **Chanyshv A. I.** To the problem of deformable medium failure. Part I: basic equations, Journal of Mining Science, 2001, 37, No. 3.
17. **Wang M. Y., Qi C. Z., Qian Q. H., et al.** One plastic gradient model of zonal disintegration of rock mass near deep level tunnels, Journal of Mining Science, 2012, 48, No. 1.

18. **Qi C. Z., Qian Q. H., Wang M. Y.** Evolution of the deformation and fracturing in rock masses near deep-level tunnels, *Journal of Mining Science*, 2009, 45, No. 2.
19. **Odintsev V. N.** Mechanism of the zonal disintegration of a rock mass in the vicinity of deep-level working, *Journal of Mining Science*, 1994, 30, No. 4.
20. **Wang X. B., Pan Y. S.** Numerical simulation of rockburst processes of a circular tunnel at different lateral pressure coefficients, *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31, No. 6.
21. **Wang X. B., Wang W., Pan Y. S.** Numerical simulation of the strain localization of the surrounding rock of a circular tunnel at different pore pressures, *Journal of China Coal Society*, 2010, 35, No. 5.
22. **Wang X. B., Pan Y. S., Wu X. L.** Numerical simulation of strain localization of a excavation circular tunnel with different rock strengths, *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2010, 30, No. 2.
23. **Wu X. L., Wang X. B., Pan Y. S.** Numerical simulation of mechanical behavior of the granular model with holes with different radii, *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2011, 22, No. 1.
24. **Wu X. L., Wang X. B., Pan Y. S.** Study of the stress and strain in surrounding rock of the tunnel based on two kinds of granular models, *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2011, 22, No. 4.
25. **Wang X. B., Wu X. L., Pan Y. S.** An equivalent continuum model for the exfoliation phenomenon of surrounding rock of a circular tunnel and effects of lateral confining pressure coefficients, *Rock and Soil Mechanics*, in press.
26. **Chanyshev A. I., Efimenko L. I.** Mathematical models of block media in problems of geomechanics. Part I: Deformation on stratified medium, *Journal of Mining Science*, 2004, 39, No. 3.
27. **Chanyshev A. I., Efimenko L. I.** Mathematical models of block media in problems of geomechanics. Part III: Diamond-shaped blocks, *Journal of Mining Science*, 2004, 40, No. 6.
28. **Bushmanova O. P., Revuzhenko A. P.** Stress state of the rock mass around a working under localization of shear strain, *Journal of Mining Science*, 2002, 38, No. 2.
29. **Lavrikov S. V., Revuzhenko A. F.** Stability of a block mass around a working, *Journal of Mining Science*, 1991, 27, No. 1.
30. **Lavrikov S. V., Revuzhenko A. F.** Deformation of a blocky medium around a working, *Journal of Mining Science*, 1990, 26, No. 6.
31. **Rodionov V. N., Sizov I. A.,** Model of a rigid body with dissipative structure for geomechanics, *Journal of Mining Science*, 1989, 25, No. 6.
32. **Wang M. Y., Fan P. X., Li W. P.** Mechanism of splitting and unloading failure of rock, *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29, No. 2.
33. **Kurlenya M. V., Oparin V. N., Vostrikov V. I.** Pendulum-type waves. Part I: State of the problem and measuring instrument and computer complexes, *Journal of Mining Science*, 1996, 32, No. 3.
34. **Kurlenya M. V., Oparin V. N., Vostrikov V. I.** Pendulum-type waves. Part II: Experimental methods and main results of physical modeling, *Journal of Mining Science*, 1996, 32, No. 4.
35. **Kurlenya M. V., Oparin V. N., Vostrikov V. I.** Pendulum-type waves. Part III: Data on on-situ observations, *Journal of Mining Science*, 1996, 32, No. 5.
36. **Опарин В. Н., Тапсиев А. П., Розенбаум М. А., Рева В. Н., Бадтиев Б. П., Тропп Э. А., Чанышев А. И.** Зональная дезинтеграция горных пород и устойчивость подземных выработок. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008.
37. **Опарин В. Н., Танайно А. С.** Каноническая шкала иерархических представлений в горном породоведении. — Новосибирск: Наука, 2011.