

Теоретические и экспериментальные методы  
механики сильно сжатых горных пород и массивов

УДК 550.3 + 622 + 681:624.1

М.А. Гузев, В.В. Макаров, Л.С. Ксендзенко, А.М. Голосов

ГУЗЕВ МИХАИЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ – член-корреспондент РАН, директор (Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток), руководитель образовательной программы «Прикладная математика и информатика» Школы естественных наук Дальневосточного федерального университета.

E-mail: guzev@iam.dvo.ru

МАКАРОВ ВЛАДИМИР ВЛАДИМИРОВИЧ – доктор технических наук, профессор, руководитель образовательной программы «Шахтное и подземное строительство» (Дальневосточный федеральный университет, Владивосток).

E-mail: vlmvv@mail.ru

КСЕНДЗЕНКО ЛЮДМИЛА СТЕПАНОВНА – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры алгебры, геометрии и анализа Школы естественных наук (Дальневосточный федеральный университет, Владивосток).

E-mail: ksendzenko@mail.ru

ГОЛОСОВ АНДРЕЙ МИХАЙЛОВИЧ – инженер кафедры горного дела и комплексного освоения георесурсов Инженерной школы (Дальневосточный федеральный университет, Владивосток).

E-mail: a-dune@mail.ru

## Геомеханика сильно сжатых горных пород и массивов

Представлены основные подходы геомеханики сильно сжатых горных пород и массивов, позволяющие проводить прогнозирование параметров зонального разрушения массива вокруг подземных выработок. Рассмотрены результаты экспериментальных исследований зонального деформирования и разрушения массива горных пород вокруг подземных выработок на месторождениях Дальнего Востока (рудники Николаевский, Приморский и др.), опасных по геодинамическим проявлениям горного давления, а также результаты моделирования мезотрещинных структур массива в рамках неевклидовой модели механики дефектных сред. Показано полное качественное и хорошее количественное совпадение данных эксперимента и теории, позволяющее переходить к прогнозу параметров зональной структуры и условий ее реализации. Статья отражает основные положения, докладов, сделанных на 4-й Российско-Китайской научной конференции в ДВФУ в июле 2014 г.

*Ключевые слова:* глубокие месторождения, сильное сжатие, горные породы, массивы, неевклидовы модели, моделирование, экспериментальные исследования, прогноз.

### Введение

Разработка месторождений полезных ископаемых на больших глубинах связана с резким увеличением риска геодинамических явлений типа горных ударов и зонального разрушения массива

---

© Гузев М.А., Макаров В.В., Ксендзенко Л.С., Голосов А.М., 2014

Работа выполнена при поддержке Научного фонда ДВФУ (грант № 13-06-0113-м\_a) и Минобрнауки РФ, (грант № 7.8652.2013).

вокруг подземных выработок, которые наиболее трудно прогнозируемы и опасны с позиций обеспечения работы людей в подземных условиях. Такие рудные месторождения Дальнего Востока, как Николаевское (г. Дальнегорск), Приморское (пос. Восток-2) и другие, требуют повышенного внимания и специальных средств контроля при разработке. Затрудненность достоверного прогноза обусловлена многими факторами, где основные – недостаточная изученность механизмов подготовки геодинамического явления, слабая критериальная обеспеченность прогноза, а также ограниченность возможностей существующих прогностических методов.

До настоящего времени основным подходом к проблеме прогноза являлся экспериментальный, основанный на отслеживании реальной ситуации при разработке месторождения и определении степени опасности массива по геодинамическим проявлениям. Однако углубление представлений о разрушении материалов приводит к необходимости построения адекватных моделей сильно сжатого массива, учитывающих предразрушающее состояние геоматериалов.

Процесс разрушения носит многостадийный характер. После появления первых микротрещин, образование которых при сжатии приводит к сложному сдвиго-отрывному процессу и – при дальнейшем увеличении нагрузки – накоплению микродефектов, что при определенных условиях приводит к их локализации в очаге макроразрушения. Здесь происходит укрупнение микродефектов за счет их слияния, образование мезотрещинной структуры и затем формирование макроразрыва [10]. Образец и массив горных пород представляют собой блочную иерархическую среду, где переход от одного уровня к другому имеет свои специфические закономерности, которые в настоящее время изучены недостаточно [3].

Существующие математические модели деформирования и разрушения горных пород в состоянии сильного сжатия в недостаточной степени учитывают несовместность деформаций, возникающую при формировании мезотрещинных структур, а также иерархичность процесса разрушения. Разработка математической модели разрушения и деформирования, адекватно описывающая состояние сильно сжатого массива, является неотъемлемой составляющей комплекса исследований горных пород в состоянии предразрушения.

Совокупность состояний горных пород в предразрушающей области нагружения, связанной с формированием и развитием диссипативных мезотрещинных структур периодического типа и описываемой математическими моделями механики дефектных сред с выстраиванием правил перехода от одного уровня иерархической блочной среды к другому, могут быть объединены в рамках концепции «сильного сжатия» горных пород [2].

Исследование закономерностей деформирования и разрушения горных пород в образцах и массиве в состоянии сильного сжатия, разработка на этой основе механизма, математической модели и метода прогноза геодинамических явлений – одна из наиболее актуальных проблем обеспечения безопасного ведения горных работ.

### **1. Зональный характер разрушения массива вокруг подземных выработок**

Эффект зонального разрушения массива вокруг подземных выработок в настоящее время хорошо известен, однако его механизмы все еще остаются малоизученными. Одним из вопросов, до сих пор не нашедших удовлетворительного ответа, является вопрос об условиях появления зональной структуры разрушения. Имеем ли мы дело с некоторой аномалией реакции массива на создание обнажений или же с закономерностью, обусловленной состоянием сильного сжатия горных пород?

Результаты исследований воздействия горного удара на массив вокруг подготовительных выработок, проведенных в условиях Южного месторождения (Приморье) в процессе бурения скважин, а также анализа выбуренного керна иллюстрирует рис. 1. Рудные тела месторождения представлены типичными жильными образованиями, несущими свинцово-цинково-серебряную минерализацию. Мощность жил колеблется в пределах от 0,05 до 3,75 м. Вмещающие породы представлены переслаиванием песчаников и алевролитов прочностью от 90 до 250 МПа.

Совокупное влияние технологических факторов, таких как зависание массива прочных пород верхней отработанной части месторождения над разрабатываемыми горизонтами в сочетании с высокими естественными напряжениями нетронутого массива, является причиной горных

ударов. Горные удары на месторождении произошли на сравнительно небольшой глубине разработки в 100–200 м. Эксперимент, по оценке трещинной нарушенности массива вокруг выработки, подвергшейся воздействию горного удара, проводился в штреке 206 блоков 1-206 и 0-206 рудной жилы № 4. Наблюдения состояли в бурении вееров скважин диаметром 42 мм по нескольким сечениям вдоль рудного штрека и количественной оценке состояния массива по выбуренному керну.

В результате исследований установлен эффект зонального разрушения массива горных пород вокруг подвергшейся воздействию горного удара одиночной выработки. Зоны интенсивной трещиноватости в окрестности выработки строго чередуются с относительно монолитными участками массива. На рис. 1 показано характерное распределение зональной структуры по ближнему к области удара вееру. Характерно, что дискование керна приурочено, как правило, к промежуточным зонам, а на расстоянии 140 м от центра горного удара нет зонального распределения трещин, что свидетельствует об обусловленности появления такой структуры разрушения массива высокими напряжениями, вызванными горным ударом. Таким образом, гипотеза обусловленности реализации периодических трещинных структур в массиве вокруг выработок условиями сильного сжатия находит подтверждение.

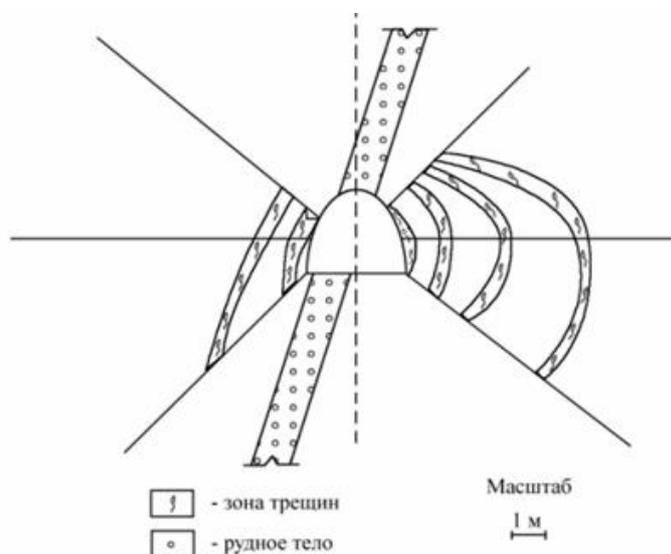


Рис. 1. Характер зонального разрушения массива вокруг выработки, подвергшейся воздействию горного удара

Зональное деформирование горных пород в массиве вокруг подземных выработок установлено на Николаевском месторождении, разрабатываемом на глубине, превышающей 500 м, что в условиях тектонически активного района обуславливает высокое напряженное состояние массива горных пород и опасность возникновения геодинамических явлений. Исследование закономерностей зонального деформирования горных пород в массиве вокруг одиночных капитальных выработок было осуществлено в однородных породах методом глубинных реперов, предусматривающим бурение глубоких скважин в борта и кровле выработки непосредственно после ее приведения в соответствие с требованиями стандартов на подобные испытания [2].

Периодичность наблюдений составляла от 1 до 10 сут. В результате наблюдений получен массив данных результатов измерений смещений реперов по всем станциям. На основе этих данных построены графики смещений и деформаций породного массива в зависимости от времени. Установлено, что деформирование вмещающих пород носит незатухающий, знакопеременный характер. Это свидетельствует о процессах разрушения, происходящих в массиве, чередовании процессов уплотнения и разуплотнения вмещающих пород, о нахождении пород массива в состоянии динамической неустойчивости. На рис. 2 показан характер деформирования массива вдоль скважины в отдельные моменты наблюдения. Хорошо видно, что деформирование носит зональный

характер: в контурной части массива преобладают деформации сжатия, затем отмечена ярко выраженная зона относительного растяжения, за которой вновь отмечена зона сжатия. В целом по скважине длиной 10 м отмечено три пары таких зон, что соответствует аналогичной картине, установленной для условий шахты им. Артема [2].

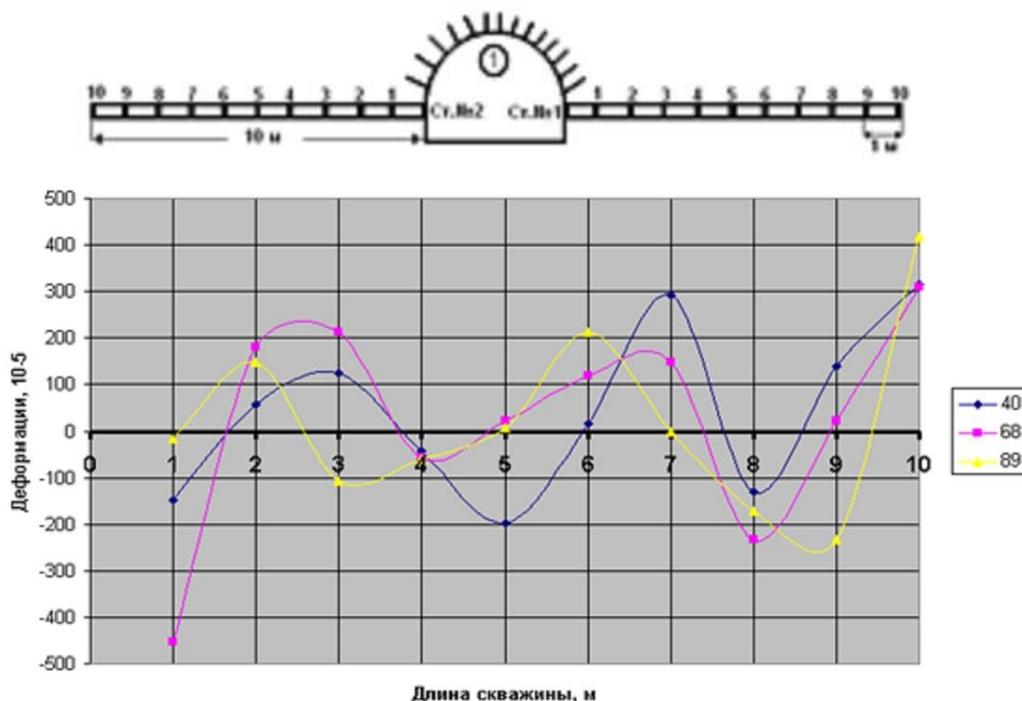


Рис. 2. Эволюция зональной структуры деформирования массива во времени (горизонт –390 м, скважина 1, для времени 40, 68 и 89 сут.)

Таким образом, зональное деформирование и разрушение массива горных пород вокруг подземных выработок имеет свои закономерности, заключающиеся в том, что параметры зональной структуры имеют однозначно определяемые тенденции изменения от контурной части массива в его глубинную часть, а сама структура от момента формирования претерпевает закономерные изменения во времени, обусловленные самопроизвольно возникающими процессами прохождения волн разрушения в массиве.

Установление таких закономерностей требует разработки метода определения параметров зональной структуры разрушения массива вокруг подземных выработок, позволяющего прогнозировать эти параметры, основываясь на данных геологоразведочных работ.

## 2. Математическая модель зонального деформирования и разрушения массива вокруг глубоких подземных выработок

Массив горных пород в условиях действия больших неравнокомпонентных сжимающих напряжений, определяющих сдвиговые микроразрушения на неоднородностях среды, моделируется сплошной средой, для которой выполняются стандартные уравнения равновесия. Дальнейшая редукция модели состоит в том, что краевая задача о распределении поля напряжений вокруг выработки рассматривается как плоская и стационарная [1], поскольку в механике подземных сооружений в большинстве ситуаций изучается плоская деформация массива вокруг подземных выработок:

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r}(\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}) = 0, \sigma_{r\varphi} = 0, r_0 < r < \infty, \quad (1)$$

где  $\sigma_{rr}$  – нормальное радиальное напряжение,  $\sigma_{\varphi\varphi}$  – нормальное тангенциальное напряжение,  $\sigma_{r\varphi}$  – касательное напряжение.

При наличии в среде дефектов структура поля внутренних напряжений складывается из классического поля упругих напряжений и поля напряжений, созданного дефектами. С точки зрения кинематики это означает, что в общем случае не выполняются условия совместности для деформаций  $\varepsilon_{ij}$ , соответствующих этому полю. Для плоской деформации существует единственная функция  $R$ , характеризующая «дефектность» среды:

$$R = \frac{\partial^2 \varepsilon_{22}}{\partial x_1 \partial x_1} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{11}}{\partial x_2 \partial x_2} - 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{12}}{\partial x_1 \partial x_2}. \quad (2)$$

В классической теории упругости  $R=0$ , тогда для рассматриваемой нами модели отличие правой части (2) от нуля соответствует наличию дефектных структур в среде.

В работе [2] получено спектральное бигармоническое уравнение для определения  $R$ :

$$\Delta^2 R = q^2 R. \quad (3)$$

Уравнения (1), (3) дополняются соотношением несовместности в компонентах напряжений

$$\Delta \sigma = \frac{E}{2(1-\nu)} R, \quad \sigma \rightarrow 2(1+\nu)P_\infty \text{ при } r \rightarrow \infty. \quad (4)$$

Краевые условия для уравнений включают стандартные формулировки, в которых на контуре выработки ( $r=r_0$ ) внешние силы отсутствуют, а на бесконечности они заданы:

$$\sigma_{rr} = 0 \text{ при } r = r_0, \quad \sigma_{rr}, \quad \sigma_{\varphi\varphi} \rightarrow \sigma_\infty \text{ при } r \rightarrow \infty, \quad (5)$$

где  $\sigma_\infty = \gamma_n \cdot H$ ,  $\gamma_n$  – удельный вес пород,  $H$  – глубина заложения выработки. Другой тип условий задается для неклассического объекта  $R$ , и они записываются в следующем виде:

$$\frac{\partial R}{\partial r} = 0 \text{ при } r = r_0, \quad \frac{\partial R}{\partial r} = 0 \text{ при } r = r^*, \quad (6)$$

где значение  $r^*$  определяется из эксперимента.

При граничных условиях (5) строится решение для  $\sigma_{rr}$  и  $\sigma_{\varphi\varphi}$ :

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= \sigma_\infty \left( 1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right) - \frac{E}{2(1-\nu^2)\gamma^{3/2}} \cdot \frac{1}{r} \left[ aJ_1(\sqrt{\gamma} \cdot r) + bN_1(\sqrt{\gamma} \cdot r) + cK_1(\sqrt{\gamma} \cdot r) \right], \\ \sigma_{\varphi\varphi} &= \sigma_\infty \left( 1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right) + \frac{E}{2\gamma^{3/2}(1-\nu^2)r} \left[ a_1J_1(\sqrt{\gamma}r) + a_2N_1(\sqrt{\gamma}r) + a_3K_1(\sqrt{\gamma}r) \right] - \\ &- \frac{E}{2\gamma(1-\nu^2)} \left[ a_1J_0(\sqrt{\gamma}r) + a_2N_0(\sqrt{\gamma}r) - a_3K_0(\sqrt{\gamma}r) \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Аналитический расчет напряжений произведен для условий экспериментов по определению закономерностей развития зональной структуры разрушения вокруг одиночных выработок, проведенных ВНИМИ в Донбассе. Результаты расчета компонент радиальных и тангенциальных напряжений  $\sigma_{rr}$  и  $\sigma_{\varphi\varphi}$ , а также функции дефектности  $R(r)$  приведены на рис. 3. Хорошо виден осциллирующий характер как тангенциальных, так и радиальных напряжений вокруг выработки, а также функции дефектности.

Для определения положения разрушенных зон может быть использован критерий отрывного разрушения В.Н. Оudinцева в условиях всестороннего сжатия в виде [4]:

$$K_1 = (\pi l)^{1/2} (\gamma_1 \sigma_1^0 - \gamma_3 \sigma_3^0), \quad (8)$$

где  $l$  – полудлина трещинных дефектов массива, которая принимается равной минимальной полудлине неустойчивых макротрещин отрыва, м;  $\sigma_1^0$ ,  $\sigma_3^0$  – соответственно max и min главные

напряжения, МПа;  $\gamma_1, \gamma_3$  – эмпирические коэффициенты;  $K_I$  – коэффициент интенсивности напряжений, МПа $\cdot$ М $^{1/2}$ ;  $K_{Ic}$  – трещиностойкость горных пород, МПа $\cdot$ М $^{1/2}$ .

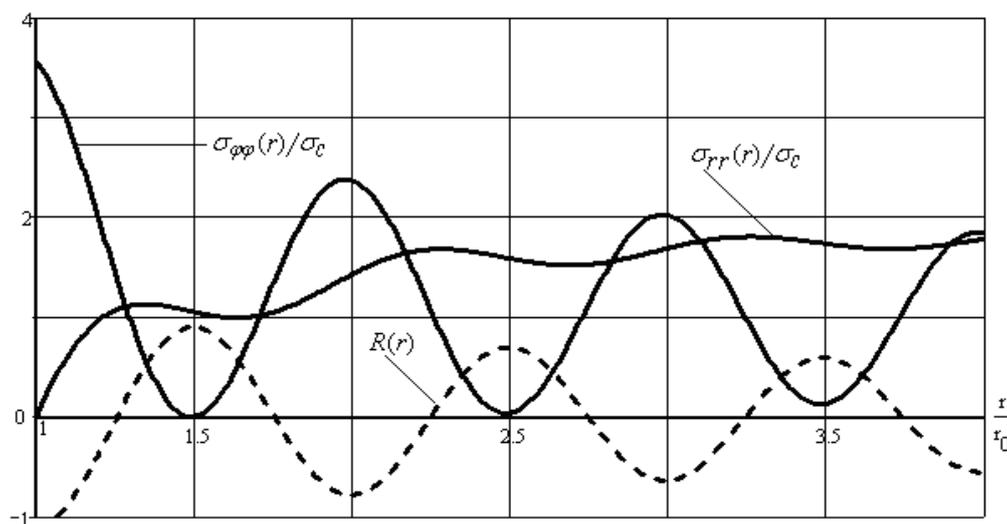


Рис. 3. Осциллирующий характер напряжений и  $R$ -функции в массиве вокруг подземной выработки

Закономерности изменения относительных значений критерия разрушения показаны на рис. 4. Превышение относительным критериальным параметром значений единицы означает возможность разрушения отрывом. Изменения радиальной протяженности зон разрушения и промежуточных зон имеют полную качественную сходимость с данными работы [6].

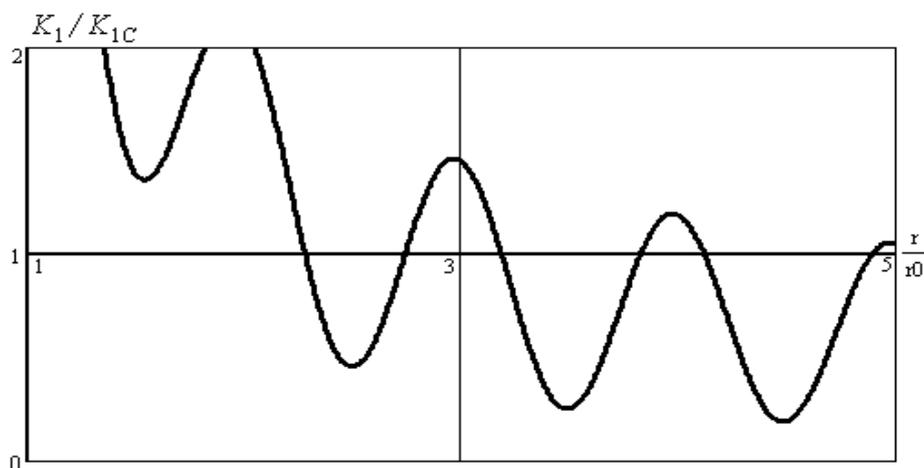


Рис. 4. Характер изменения относительных значений критерия отрывного разрушения при наличии 4 зон разрушения в массиве вокруг выработки

В результате исследований установлено, что основным фактором, влияющим на параметры зональной структуры разрушения, является величина действующих в массиве напряжений (глубина заложения выработки). С ростом напряжений растет число разрушенных зон, увеличивается их радиальная протяженность вплоть до слияния соседних зон, причем тем быстрее, чем ближе зона расположена к контуру выработки. При этом граница последней зоны разрушения перемещается в глубь массива.

Параметры трещинной структуры массива ( $l, K_{Ic}, \gamma_3/\gamma_1$ ) оказывают существенное влияние на характер зонального разрушения. Радиальная протяженность разрушенных зон уменьшается

при увеличении трещиностойкости породы. С уменьшением трещиностойкости зоны разрушения появляются при меньших относительных напряжениях, а расстояние последней зоны от контура выработки увеличивается.

Интенсивность нарушенности пород также оказывает существенное влияние на параметры зональной структуры разрушения. При увеличении длины трещинных дефектов массива радиальная протяженность зон разрушения возрастает, а при увеличении отношения  $\gamma_3/\gamma_1$  уменьшается. Закономерности, установленные для малопрочных пород, оказываются справедливыми и для прочных пород.

Сравнительные значения границ зон разрушения, полученные в натурном эксперименте и теоретическом расчете для случая Донбасса, приведены в табл. 1. Можно отметить удовлетворительное совпадение этих результатов. Сравнение значений относительных критических напряжений образования зон разрушения для этих же условий также показывает допустимые расхождения результатов теории и эксперимента (см. табл. 1).

Удовлетворительное совпадение результатов экспериментальных и теоретических исследований позволяет дать формулировку механизма явления зонального разрушения массива горных пород вокруг подземных выработок, заключающегося в том, что в условиях сильного неравнокомпонентного сжатия горных пород и обусловленных этим развитием микросдвиговых разрушений на неоднородностях среды напряжения в массиве приобретают осцилляционный периодический характер, а на локальных участках (зонах) действия максимальных нормальных тангенциальных напряжений развиваются трещины отрыва, определяя сжатие промежуточных зон в нормальном к границе разуплотненных зон направлении.

Таблица 1

**Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований закономерностей зонального разрушения**

Характеристики зональной структуры	Элементы зональной структуры, № зоны разрушения			
	1-я зона	2-я зона	3-я зона	4-я зона
Положение дальней границы зоны, $r/r_0$				
Эксперимент [8]	1,03	2,23	3,40	4,54
Теория	1,28	2,17	3,09	3,97
Отклонение, %	24	-2,7	-9,1	-12,6
Относительные критические напряжения образования зоны, $\sigma/\sigma_c$ [8]				
Эксперимент	1,1	2,2	2,7	–
Теория	0,95	2,1	3,1	–
Отклонение, %	-13,9	-4,5	14,8	–

Разработка методики определения параметра периодичности модели зонального разрушения массива горной породы вокруг выработки на большой глубине проведена методом статистической обработки данных имеющихся натуральных экспериментов по зональному разрушению массива вокруг горных выработок. Обобщены данные по месторождениям Дальнего Востока, Сибири, Донбасса, КНР и др. (табл. 2).

Установлена эмпирическая линейная зависимость между положением середины первой зоны разрушения массива вокруг горной выработки, измеряемой в относительных к радиусу выработках единицах, и пределом прочности пород на одноосное сжатие. Положение середины первой зоны разрушения как функция предела прочности породы на одноосное сжатие определяется линейной зависимостью (коэффициент корреляции равен 0,998):

$$r^*/r_0 = 0,008\sigma_c + 0,757. \quad (9)$$

Здесь  $r^*$ , м – расстояние от контура выработки до середины I внутренней зоны разрушения, определенное экспериментально; радиус  $r_0$ , м – радиус выработки.

Таблица 2

**Положение первой зоны разрушения по данным экспериментов**

Географическое расположение пород	Шахта им. Артема, пос. Шкотово	Донбасс [8]	Норильск [7]	Дальнегорск	КНР [5]
Положение 1 з. п. $r^*/r_0$ по данным экспериментов	0,8	1,0	2,0	1,5	1,1
Предел прочности $\sigma_c$ , МПа	8	25	150	100	50
Положение 1 з. п. $r^*/r_0$ по теоретической формуле $r^*/r_0 = 0,008\sigma_c + 0,757$	0,821	0,957	1,957	1,557	1,157

Значение параметра периодичности модели  $\gamma$ , отражающего частоту осцилляций напряжений и других характеристик модели вокруг выработки, приведены в табл. 3. Значение амплитудного параметра  $c$  определяются из условий представления устойчивого макродефекта образца как мезодефекта массива, длину которых можно определить так, как это сделано в [4]. При этом напряжения в массиве, соответствующие появлению первой зоны разрушения, можно применять на уровне остаточной прочности образца (табл. 4), а коэффициенты интенсивности напряжений для трещин отрыва принимать приблизительно равными [4].

Таблица 3

**Экспериментальная зависимость между  $\gamma$  и отношением  $r^*/r_0$**

Параметр модели	Географическое расположение месторождения		
	Норильск	Донбасс	Приморский край, шахта им. Артема (п. Шкотово)
$\gamma$	3	13	17
$r^*/r_0$	2	1	0.6

Соотношения размеров породных блоков различных иерархических уровней и дефектов различных масштабных уровней для образцов горных пород и массивов приведено в табл. 4.

**3. Прогноз параметров зональной структуры разрушения массива вокруг подземных выработок**

Прогноз параметров зональной структуры разрушения массива вокруг горных выработок выполнен по рассмотренной выше методике для условий Николаевского месторождения (г. Дальнегорск). Экспериментально определены максимальный диаметр минерального зерна, максимальное расхождение берегов в центральной части мезотрещины, длина мезотрещины и величины эмпирических коэффициентов  $\gamma_1, \gamma_3$ :

$d_{\max} = 0,1 \text{ мм}, h^* \approx 0,1 \text{ мм} = 0,0001 \text{ м}, \frac{\gamma_3}{\gamma_1} = 0,8, \gamma_3 = 0,2, \gamma_1 = 0,25$ , а также предел прочности на одноосное сжатие, модуль Юнга и коэффициент Пуассона:  $\sigma_c = 100 \text{ МПа}, E = 50000 \text{ МПа}, \nu = 0,21$ .

Вычисление параметров математической модели зонального разрушения массива дает (при  $r_0=2,5 \text{ м}$ ):

$$\gamma = 2,008865, C = 1,0695145 \cdot 10^{-7},$$

$$E = 5000 \text{ МПа}; \nu = 0,21; \sigma_c^{ocm} = 10 \text{ МПа}; l = 0,13 \text{ м}; K_I = 1,6 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{\frac{1}{2}}; \gamma_1 = 0,25; \gamma_3 = 0,2.$$

Таблица 4

**Соотношение размеров дефектов на различных иерархических уровнях блоковой структуры горных пород**

Уровень		Размер блока	Длина трещины		Коэффициент интенсивности напряжений $K_I, \text{ МПа} \cdot \text{м}^{-1/2}$	Предел прочности
Иерархический	Масштабный		Min	Max		
Образец	Мезо	$d_{\max}$ – размер минерального зерна	$d_{\max}$	$d_{\max} \div (5-10)d_{\max}$	$K_I = \sqrt{\pi l_{mezo}} \gamma_1 \cdot \sigma_c$	$\sigma_c$
	Макро	$d=30-70 \text{ мм}$ – диаметр образца, $h=60-140$ – высота образца	$d_{\max} \div (5-10)d_{\max}$	$2l_{*}^{обр} = \frac{h_* \cdot E}{4(1-\nu^2)\gamma_1 \cdot \sigma_c}$	$K_I = \sqrt{\pi l_{macro}} \gamma_1 \cdot \sigma_c$	$\sigma_c$
Массив	Мезо	Размер блока горной породы $h_{обр} - 10h_{обр}$	$l_{mezo}^{масс} \approx l_{*}^{обр}$	$l_{mezo}^{масс} \approx (5 \div 10)l_{*}^{обр}$	$K_I = \sqrt{\pi l_{mezo}^{масс}} \gamma_1 \cdot \sigma_{ocm}$	$\sigma_{ocm}$
	Макро	Размер равновелик диаметру выработки: $d_{выр} - 10d_{выр}$	$l_{mezo}^{масс} \approx (5 \div 10)l_{*}^{обр}$	$2l_{*,max}^{масс макро} = \frac{h_*^{масс} \cdot E}{4(1-\nu^2)\gamma_1 \cdot \sigma_{ocm}}$	–	$\sigma_c^*$

После вычислений получаем глубину появления зон разрушения (табл. 5).

Оценка степени точности прогноза зонального разрушения и деформирования массива вокруг подземных выработок проведена по результатам измерений деформаций в массиве, рассмотренном выше (см. рис. 2). В условиях больших глубин, где вокруг выработок начинаются процессы образования мезотрещин, основной вклад в деформирование вносит «дефектная» составляющая деформаций, в то время как упругая компонента пренебрежимо мала (с учетом отставания установки станций от забоя). В связи с этим теоретическая величина деформаций определяется по обычным формулам механики, связывающим деформации и напряжения линейной зависимостью [1], где под напряжениями понимается только «добавка», обусловленная «дефектным вкладом» формулы (7).

Рассмотрим результаты измерения деформаций по скв. 1 наблюдательной станции горизонта –390 м рудника «Николаевский» (г. Дальнегорск), отраженные в табл. 6 и на рис. 5. Хорошо видна периодическая картина деформирования вмещающих пород, изменяющаяся во времени.

Таблица 5

Прогноз появления зон разрушения на руднике «Николаевский»

№ зоны разрушения	I	II	III	IV
Относительное критическое напряжение зонообразования	1,3	2,3	2,9	3,3
Глубина появления зоны, м	520	920	1160	1320

Таблица 6

Деформации массива вдоль скважины № 1. Станция, горизонт –390 м, рудник «Николаевский» ( $\epsilon \times 10^5$ )

Время наблюдения	Участки наблюдения вдоль скважины, м									
	1–0	2–1	3–2	4–3	5–4	6–5	7–6	8–7	9–8	10–9
Сутки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
40	-148	58	124	-43	-197	16	292	-131	139	316
68	-452	180	214	-57	22	120	148	-233	22	308
89	-15	148	-107	-60	7	212	-2	-173	-234	418
Средняя за 40, 68 и 89 сут.	-205	130	110	-53	-168	116	146	-131	-179	150

Анализ экспериментальных результатов и их сравнение с данными, полученными теоретически (рис. 5), демонстрирует хорошее качественное совпадение радиальных деформаций, полученных экспериментально и с помощью модели зонального разрушения сильно сжатого массива. Количественное совпадение также находится на удовлетворительном уровне: разница расчетных значений радиальных деформаций от установленных экспериментально не превышает 47%.

Экспериментальные исследования зональной структуры разрушения массива вокруг подземных выработок в условиях Норильска проведены в работе [7]. Результаты измерения положения ближней и дальней границ зон разрушения, полученные теоретически, на основе разработанной модели зонального разрушения сильно сжатого массива, дают хорошую сходимость с данными натурных экспериментов [7] (рис. 6).

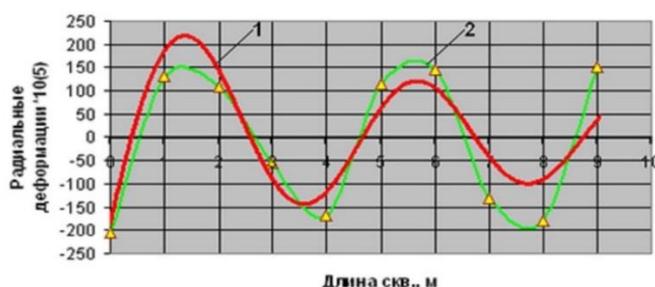


Рис. 5. Сравнение графиков радиальных деформаций: 1 – теория; 2 – эксперимент (среднее за время наблюдения 40, 68 и 89 сут., горизонт –390 м, скважина 1)

Расхождение усредненных экспериментальных данных с теоретическими не превышает 16% (табл. 7). Сравнения проводились для следующих значений параметров:  $l=0,045$  м;  $\gamma_3/\gamma_1=0,8$ ;  $E=25000$  МПа,  $\nu=0,14$ ;  $K_{lc}=1,24$  МПа $\cdot\sqrt{м}$ . Теоретическое положение зон нанесено по данным табл. 7 при  $\sigma_{ocm}^c=14$  МПа;  $\sigma/\sigma_c=2$ . Расстояние от контура выработки ближней границы 1 з. р.

1,2, дальней – 2,37 радиуса выработки, считая от контура. Расстояние от контура выработки ближней границы 2 з. р. 3,71, дальней – 4,09 радиуса выработки.

Таблица 7

**Сравнение результатов натуральных и аналитических исследований  
для условий Норильска по усредненным данным [7]**

Граница зоны разрушения	Эксперимент, $r/r_0$	Теория, $r/r_0$	Отклонение, %	Примечание
Ближняя граница первой зоны	1,4	1,20	-14,29	Начало отсчета от контура выработки. В теории $\sigma/\sigma_c = 2$
Дальняя граница первой зоны	2,47	2,37	-4,05	
Ближняя граница второй зоны	3,2	3,71	15,94	
Дальняя граница второй зоны	3,97	4,09	3,02	

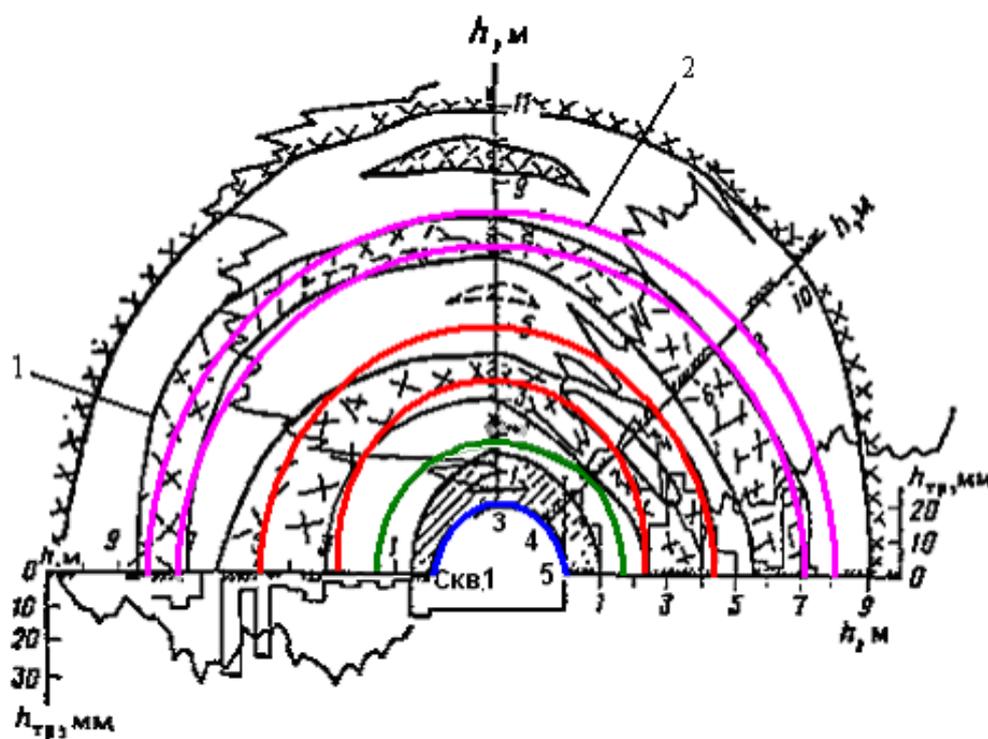


Рис. 6. Графическое сравнение данных натурального [7] и численного экспериментов для условий Норильска: 1 – экспериментальная граница зоны; 2 – теоретическая граница зоны

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет получить полное качественное и хорошее количественное соответствие теоретических и экспериментальных данных исследований зональной структуры разрушения и деформирования массива.

**Заключение**

Зональное деформирование и разрушение пород в массиве вокруг подземных выработок, закономерности которого рассмотрены в статье, является лишь одним из проявлений состояния сильного сжатия горных пород и массивов, обусловленного появлением в материале диссипативных мезотре-

щинных структур периодического типа. Привлечение аппарата механики дефектных сред к вопросам моделирования материала горных пород в предразрушающем состоянии позволяет отстраивать континуальные модели, хорошо зарекомендовавшие себя при анализе других явлений периодического типа, таких как реверсивный характер деформаций образцов при одноосном сжатии и др.

Успешное моделирование зонального разрушения и разработка метода определения параметров модели в результате экспериментальных исследований позволяет переходить к прогнозу геодинамических явлений, что обеспечивает решение практически важной задачи обеспечения безопасности отработки месторождений в условиях сильного сжатия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений. М.: Недра, 1994. 382 с.
2. Гузев М.А., Макаров В.В. Деформирование и разрушение сильно сжатых горных пород вокруг выработок. Владивосток: Дальнаука, 2007. 232 с.
3. Макаров В.В., Куксенко В.С., Рассказов И.Ю., Дамаскинская Е.Е. Прогнозирование геодинамических явлений в сильно сжатых горных породах и массивах: монография [Электронный ресурс] / Инженерная школа ДВФУ. Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2013. 130 с.
4. Одинцев В.Н. Отрывное разрушение массива скальных горных пород. М.: ИПКОН РАН, 1996. 166 с.
5. Ци Чэнчжи, Цянь Циху, Ван Минян. Математическое моделирование зонального разрушения массива вокруг подземных выработок и реверсивного деформирования образцов горных пород // Вестник Дальневосточного государственного технического университета. 2011. № 3/4. С. 92–120. URL: [vestnikis.dvfu.ru/vestnik/archive/2011](http://vestnikis.dvfu.ru/vestnik/archive/2011).
6. Шемякин Е.И., Фисенко Г.Л., Курленя М.В. и др. Эффект зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок // ДАН СССР. 1986. Т. 289, № 5. С. 3–9.
7. Шемякин Е.И., Фисенко Г.Л., Курленя М.В., Опарин В.Н. и др. Зональная дезинтеграция горных пород вокруг подземных выработок. Ч. 1. Данные натурных наблюдений // ФТПРПИ. 1986. № 3. С. 3–15.
8. Шмиголь А.В., Кириченко В.Я., Бучатский С.К., Рева В.Н. Шахтные исследования характера разрушения слабых пород на шахтах Западного Донбасса // Шахтное строительство. 1987. № 5. С. 11–12.
9. Guzev M.A., Paroshin A.A. Non-Euclidean Model of the Zonal Disintegration of Rocks around an Underground Openings. *Journal of Applied Mechanics & Technical Physics*. 2001;42:131-139.
10. Lockner D.A., Byerlee J.D., Kuksenko V., Ponomarev A., Sidorin A. Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite. *Nature*. 1991;(350)7:39-42.

**THIS ARTICLE IN ENGLISH SEE NEXT PAGE**

Guzev M.A., Makarov V.V., Ksendzenko L.S., Golosov A.M.

MICHAEL A. GUZEV, Corresponding Member of RAS, Professor, Director (Institute of Applied Mathematics FEB RAS, Vladivostok, Russia); VLADIMIR V. MAKAROV, Professor, School of Engineering, (Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia). E-mail: vlmvv@mail.ru; LUDMILA S. KSENDZENKO, Assistant-Professor, Department of Mining Engineering, School of Engineering (Far-Eastern Federal University, Vladivostok, Russia); ANDREI M. GOLOSOV – Engineer, School of Engineering (Far-Eastern Federal University, Vladivostok, Russia). E-mail: a-dune@mail.ru

## Geomechanics of high stressed rocks and massives

The basic approaches of geomechanics of highly stressed rocks and massive are presented, allowing to make forecasting of parameters of *zonary* destruction of a massive around underground openings. Main results of experimental researches of zonary deforming and destruction of a rock massive around underground openings on deposits of the Far East (mines Nikolaevskaya, Primorskaya etc.), dangerous on geodynamic phenomena of in situ pressure, are considered. Results of modelling of mesocracking structures in frameworks of non-Euclidean model are presented of mechanics of defective mediums. Full qualitative and good quantitative coincidence of experiment and the theory is shown. Possibility of the forecast of parameters of zonary structure and conditions of its realisation is shown. Article reflects the basic results received during realisation Federal Program «Scientific staff of Russia» in FENTU-FEFU.

*Key words:* deep deposits, high stress, rock, massives, non-Euclidean model, modelling, experimental research, forecast.

### REFERENCES

1. Boulichev N.S. Mechanics of underground construction. M., Nedra, 1994, 382 p. (in Russ.). [Bulychev N.S. Mehanika podzemnyh sooruzhenij. M.: Nedra, 1994. 382 s.].
2. Guzev M.A., Makarov V.V. Deformation and failure of highly stressed rock around the openings. Vladivostok, Dal'nauka, 2007, 232 p. (in Russ.). [Guzev M.A., Makarov V.V. Deformirovanie i razrushenie sil'no szhatyh gornyh porod vokrug vyrabotok. Vladivostok: Dal'nauka, 2007. 232 s.].
3. Makarov V.V., Kuksenko V.S., Rasskazov I.Y., Damaskinsky E.E. Prediction of geodynamic phenomena in highly stressed rocks and massives: monograph [Electronic resource], School of Engineering FEFU. Vladivostok, Far Eastern Federal University, 2013, 130 p. (in Russ.). [Makarov V.V., Kuksenko V.S., Rasskazov I.Ju., Damaskinskaja E.E. Prognozirovanie geodinamicheskikh javlenij v sil'no szhatyh gornyh porodah i massivah: monografija [Jelektronnyj resurs] / Inzhenernaja shkola DVFU. Vladivostok: Dal'nevost. federal. un-t, 2013. 130 s.].
4. Odintsev V.N. Stress-tensile failure of brittle rock massive. M., IPKON RAS, 1996, 166 p. (in Russ.). [Odincev V.N. Otryvnoe razrushenie massiva skal'nyh gornyh porod. M.: IPKON RAN, 1996. 166 s.].
5. Qi Chengzhi, Qian Qihua, Wang Min. Mathematical modeling of fracture zone massive around openings and reversible deformation of rock samples. Bulletin of the Far Eastern State Technical University. 2011;3/4:92-120. URL: [vestnikis.dvfu.ru/vestnik/archive/2011](http://vestnikis.dvfu.ru/vestnik/archive/2011). (in Russ.). [Ci Chjenchzhi, Cjan' Cihu, Van Minjan. Matematicheskoe modelirovanie zonal'nogo razrushenija massiva vokrug podzemnyh vyrabotok i reversivnogo deformirovanija obrazcov gornyh porod // Vestnik Dal'nevostochnogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta. 2011. № 3/4. S. 92–120. URL: [vestnikis.dvfu.ru/vestnik/archive/2011](http://vestnikis.dvfu.ru/vestnik/archive/2011)].
6. Shemyakin E.I., Fissenko G.L., Kurlenya M.V. et al. Effect of zonal disintegration of rocks around underground openings. Akad. 1986;(289)5:3-9. (in Russ.). [Shemjakin E.I., Fisenko G.L., Kurlenja

- M.V. i dr. Jeffect zonal'noj dezintegracii gornyh porod vokrug podzemnyh vyrabotok // DAN SSSR. 1986. T. 289, № 5. S. 3-9].
7. Shemyakin E.I., Fissenko G.L., Kurlenya M.V., Oparin V.N. et al. Zonal disintegration of rocks around underground openings. Part 1 Data of in situ observations. FTPRPI. 1986;3:3-15. [Shemjakin E.I., Fissenko G.L., Kurlenja M.V., Oparin V.N. i dr. Zonal'naja dezintegracija gornyh porod vokrug podzemnyh vyrabotok. Ch. 1. Dannye naturnyh nabljudenij // FTPRPI. 1986. № 3. S. 3-15].
  8. Shmigol A.V., Kirichenko V.Y., Buchatsky S.K., Reva V.N. Study of the in situ destruction of weak rocks in West Donbass mines. Mine construction. 1987;5:11-12. (in Russ.). [Shmigol' A.V., Kirichenko V.Ja., Buchatskij S.K., Reva V.N. Shahtnye issledovanija haraktera razrushenija slabyh porod na shahtah Zapadnogo Donbassa // Shahtnoe stroitel'stvo. 1987. № 5. S. 11-12].
  9. Guzev M.A., Paroshin A.A. Non-Euclidean Model of the Zonal Disintegration of Rocks around an Underground Openings. Journal of Applied Mechanics & Technical Physics. 2001;42:131-139.
  10. Lockner D.A., Byerlee J.D., Kuksenko V., Ponomarev A., Sidorin A. Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite. Nature. 1991;(350)7:39-42.