

УДК 622.023.001.57

*В.С. Куксенко, М.А. Гузев, В.В. Макаров, И.Ю. Рассказов*

*Куксенко Виктор Степанович* – д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории физики прочности (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург). E-mail: victor.kuksenko@mail.ioffe.ru

*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 (Владивосток).

E-mail: guzev@iam.dvo.ru

*Макаров Владимир Владимирович* – д.т.н., профессор, руководитель образовательной программы «Шахтное и подземное строительство» (Дальневосточный федеральный университет, Владивосток). E-mail: vlmvv@mail.ru

*Игорь Юрьевич Рассказов* – д.т.н., директор (Институт горного дела ДВО РАН, Хабаровск). E-mail: adm@igd.khv.ru

## КОНЦЕПЦИЯ СИЛЬНОГО СЖАТИЯ ГОРНЫХ ПОРОД И МАССИВОВ

Показаны закономерности формирования и развития диссипативных мезотрещинных структур в образцах горных пород и в массивах вокруг подземных выработок. Представлены математические модели, адекватно описывающие экспериментально установленные явления, описана удовлетворительная согласованность теоретических и экспериментально полученных результатов. Представлена концепция «сильного сжатия» горных пород и массивов. Момент

сильного сжатия трактуется как состояние, в котором в горных породах формируются и развиваются диссипативные мезотрещинные структуры периодического типа.

*Ключевые слова:* диссипативные мезотрещинные структуры, образцы горных пород, массивы горных пород, сильное сжатие, деформирование, зональное разрушение.

**Conception of high stressed rock and mass.** V.S. Kuksenko, M.A. Guzev, V.V. Makarov, Igor Y. Rasskazov (Mining Institute, FEB RAS, Khabarovsk). It's shown the patterns of formation and development of dissipative mezofissure structures in rock samples and in rock mass around the underground workings. Presented mathematical models that adequately describe the experimentally established phenomenon, has shown satisfactory agreement of theoretical and experimental results. Introduced the concept of "power compression" of rocks and rock mass. Condition of strong compression is treated as a state in which the rocks are formed and developed mezofissure dissipative structures of periodic type.

*Key words:* dissipative mezofissure structures, samples of rocks, rock mass, strong compression, deformation, zonal destruction.

Поведение геоматериалов и горных пород в предразрушающей области нагружения представляет большой практический и научный интерес, поскольку здесь происходит подготовка геодинамических явлений типа горных ударов и землетрясений, а предотвращение разрушения возможно только с пониманием закономерностей и механизмов происходящих явлений. Несмотря на имеющиеся обширные результаты уже более века проводимых исследований, до настоящего времени общей концепции состояния горной породы в условиях сильного сжатия разработано не было.

В геомеханике прочно утвердилось представление о дилатированном состоянии горной породы при нагружении ее выше порога длительной прочности. Результаты исследования различных свойств образцов горных пород в предраз-

рушающей области нагружения показывают, что появление в дилатированных геоматериалах диссипативных мезотрещинных структур, без установления свойств которых невозможен как прогноз геодинамических явлений, так и разработка адекватных математических моделей массива горных пород в условиях сильного сжатия, связаны с деформационными и другими физическими аномалиями [4].

Представление о дилатированном состоянии горных пород восходит к работам 1885 г. О. Reynolds, где, по-видимому, впервые была выдвинута гипотеза увеличения объема гранулированных веществ за счет переупаковки гранул в процессе увеличения напряжений и предложен термин «дилатансия» (dilatancy) [35]. Затем понятие дилатансии к массиву горных пород было применено в работе [33], а в процессе дальнейших экспериментальных исследований [30] были установлены явления увеличения объема при сжатии некоторых горных пород, в частности, диабаз. Затем в работах W.F. Brace и других были проведены исследования и получены зависимости напряжения-деформации, где, начиная с некоторого уровня, названного «порогом дилатансии», объем горной породы начинал возрастать при сжатии [29].

Одновременно и независимо в работах А.Н. Ставрогина дилатансионные явления были связаны со сдвиго-отрывным характером трещинообразования в геоматериалах при сжатии [17]. Эти идеи развиты в работах В.Н. Одинцева, где была создана теория сдвиго-отрывного разрушения горных пород при сжатии, использующая методы теории трещин и механики разрушения [12]. Она развивает подходы Brace–Bombolakis, Nemat-Nasser и др. Рассмотрены микро- и макроуровни разрушения, механизмы развития микро- и макротрещин, разработаны критерии разрушения.

Процессы микротрещинообразования в образце горной породы при сжатии имеют свои закономерности, которые были установлены при испытании на жестких прессах с сервоуправлением и контролем гипоцентров образования микротрещин методом акустической томографии [32].

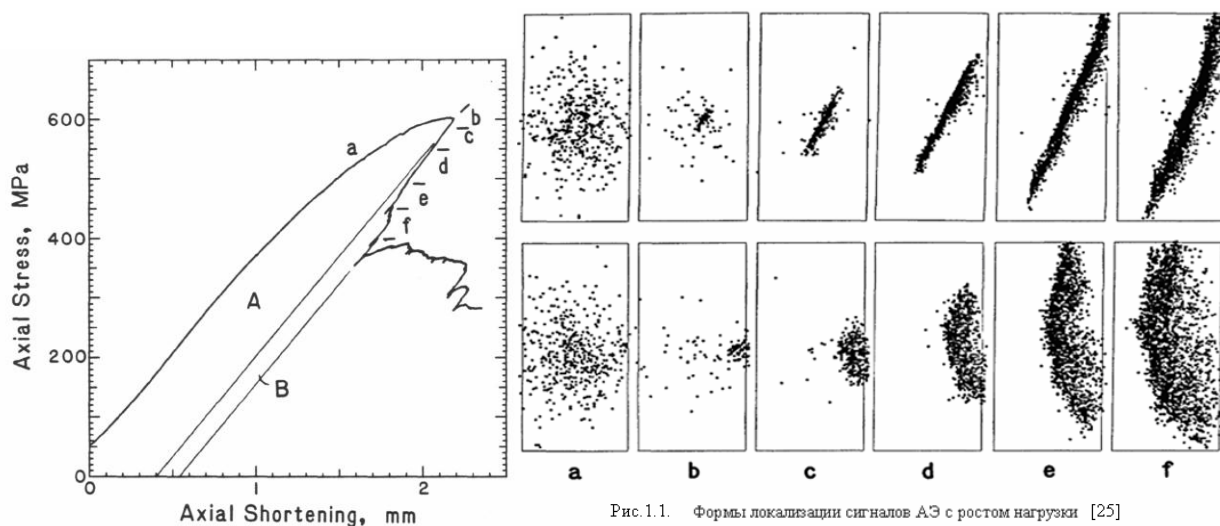


Рис. 1.1. Формы локализации сигналов АЭ с ростом нагрузки [25]

Рис. 1. Закономерности формирования макроразрушения образцов горных пород при сжатии [32]

Видно, что образец при нагружении проходит несколько стадий формирования дефектной структуры, где после прохождения этапа рассеянного накопления повреждений (a) наступает этап локализации дефектов с формированием очага макроразрушения (b, c) и последующим развитием макротрещины (d–f).

В связи с неоднородным характером развития процессов дефектонакопления представляют несомненный интерес закономерности локального деформирования образцов в окрестности очага макроразрушения. Проведенные при испытании образцов андезита Югавара цилиндрической формы комплексные исследования показали, что в этом случае было характерно хрупкое разрушение при значениях дифференциального напряжения около 300 МПа. При этом плоскости разрушения были практически параллельны оси нагружения. Гипоцентры определялись для 163 событий АЭ, имевших место при дифференциальных напряжениях, примерно, на 60% выше предела прочности. Гипоцентры характеризовались случайным распределением на уровне, примерно ниже 94% предела прочности. Несколько выше этих уровней напряжений события АЭ начинали локализовываться в области одной из плоскостей разрушения. В области локализации началу концентрирования напряжений предшествовало anomalous уменьшение локальных объемных деформаций, чередующееся с локальным их увеличением по периметру образца и появлением двух групп де-

формационных кривых объемного деформирования [34] (рис. 2). Первая группа носит традиционный U-образный характер, известный в связи с явлением дилатансии, где с ростом напряжений меняется знак приращения объемных деформаций. Ко второй группе относятся S-образные кривые, где после достижения дилатированного состояния происходит новый поворот деформационной кривой. Аналогичные закономерности наблюдаются при росте бокового давления до 80 МПа.

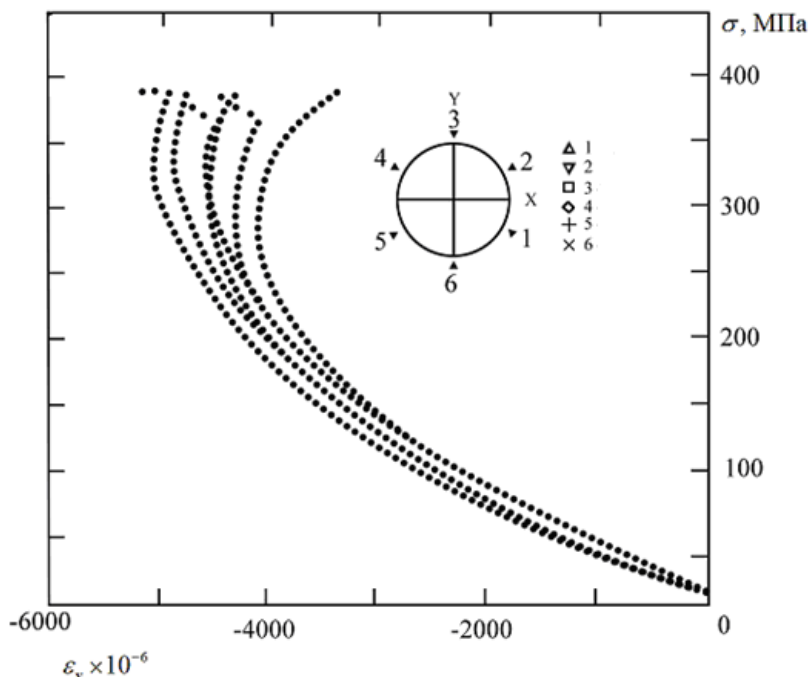


Рис. 2. Зависимость локальных объемных деформаций от дифференциальных напряжений. Положения тензометрических датчиков в центральной части образца указаны сплошными треугольниками [34]

Однако установленные в работе [34] закономерности изменения характера объемных деформаций периодического типа не нашли обобщения, и математической модели наблюдаемых явлений разработано не было, не разработаны также и критерии оценки опасности разрушения образцов, адекватные стадиям и иерархии структур разрушения.

Помимо указанных закономерностей локального деформирования образцов горных пород привлекает внимание также весьма яркий эффект локального реверсивного деформирования, имеющий место в предразрушающей области, по-видимому впервые установленный в 1972 г. при исследовании предвестни-

ков землетрясений [21]. Кроме указанной работы, авторы других исследований также отмечали аномальный реверсивный характер деформирования, заключающийся в смене знака приращения продольных и поперечных деформаций при увеличении напряжений [20]. Установлено также, что наряду с аномальным характером деформирования имеет место и «нормальное» деформирование образцов, одновременно происходящее на соседних участках образцов.

Деформационные предвестники землетрясений исследовались в последующих работах Института физики Земли АН при испытании призматических и специально изготовленных образцов [18], а также на больших образцах и бетонных моделях [15, 16, 19]. Детальное исследование деформационных предвестников землетрясений было проведено на больших призматических образцах мелкозернистого оливинового долерита [18]. Установлена смена знака приращения первого инварианта плоской деформации при нагрузках 0,75 от разрушающей. Эти результаты подтверждены при испытании специально надпиленных образцов мрамора, песчаника и известняка (рис. 3) [15].

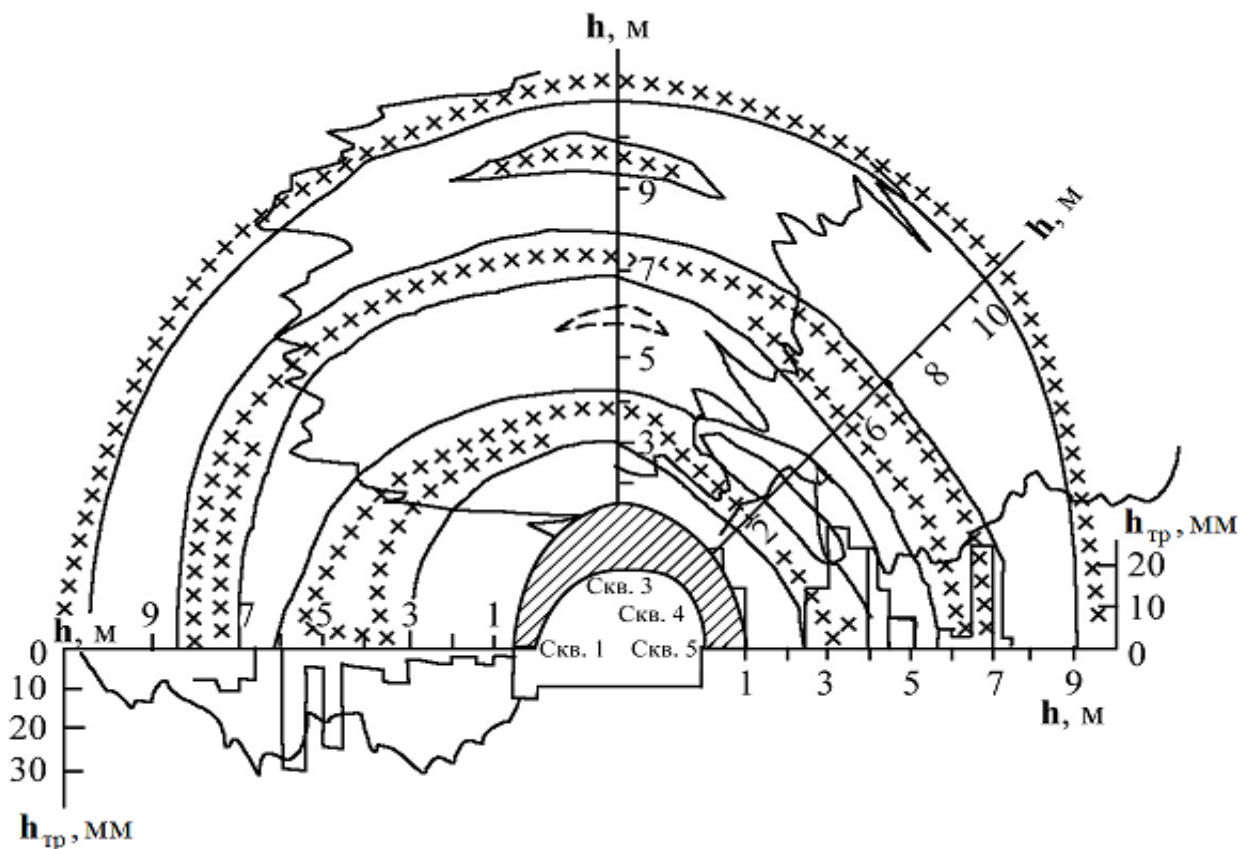


Рис. 3. Закономерности зонального разрушения массива горных пород вокруг капитальных выработок [17]

Заметим, что изменение знака приращения объемных деформаций (первого инварианта деформаций) свидетельствует о начале трещинообразования в образце и переходе его в дилатированное состояние. Это может служить долгосрочным предвестником разрушения, как показано в работе М. Kwasniewski [36]. Но наибольший интерес представляют среднесрочные и краткосрочные предвестники, которые авторам указанных работ получить не удалось.

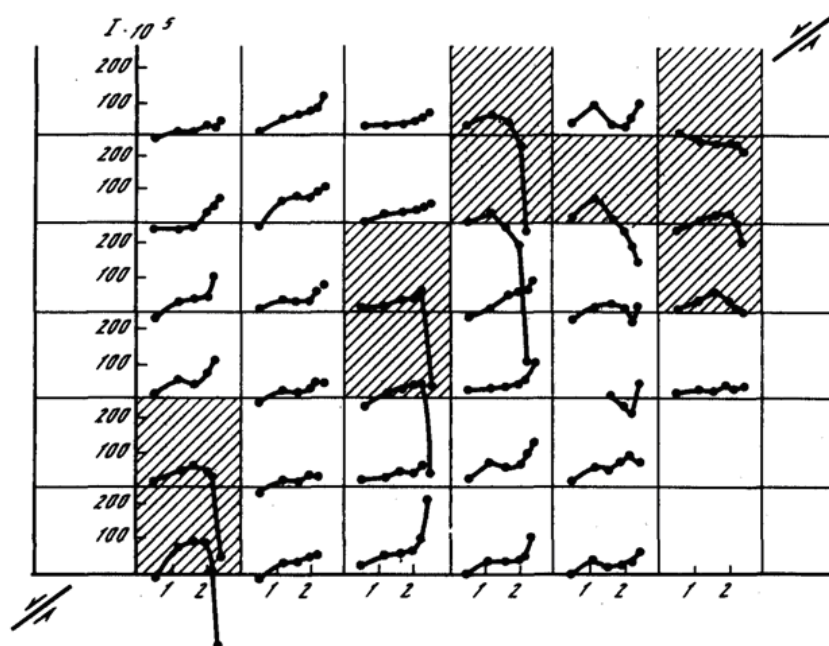


Рис. 4. Изменение во времени первого инварианта тензора плоской деформации на больших образцах [15]

Для объяснения рассмотренных аномалий деформирования образцов горных пород при сжатии выдвинуто несколько гипотез: бочкообразного деформирования, дилатансионного расширения, остаточных напряжений, наконец, гипотеза упругого восстановления предварительно сжатого материала вблизи трещины. Гипотезы не объясняют всей совокупности наблюдаемых явлений.

Наряду с аномальным характером деформирования образцов горных пород в предразрушающей области нагружения в последние годы исследователей привлек внимание эффект зонального разрушения массива вокруг подземных выработок. В 1992 г. научный коллектив во главе с академиком Е.И. Шемякин зарегистрировал открытие явления «зональной дезинтеграции», заключающейся в том, что «вокруг горных выработок образуются кольцеобразные чередующиеся зоны слабо нарушенных и разрушенных пород» [23, 24, ч. 1–4; 25]. Это открытие завершало комплекс теоретических и экспериментальных исследований, проведенных коллективом в 70–80 годы XX в.

В работах М.А. Розенбаума и Ю.Н. Кузнецова [7, 8] в результате комплексных исследований, проведенных геофизическими и перископическим ме-



тодом, а также по визуальным наблюдениям трещин в забоях пересекающихся выработок, установлено наличие до четырех трещиноватых зон вокруг капитальных одиночных выработок Норильска на глубинах от 100 до 1100 м. Зоны трещин отделены друг от друга зонами относительно ненарушенного массива и в общем повторяют контур выработки, хотя могут иметь и более сложную конфигурацию и строение (рис. 4). Открытые трещины имеют гладкие стенки, что характеризует их как трещины отрыва. Суммарное раскрытие трещин в зонах больше, чем величина конвергенции в выработке, что свидетельствует об уплотнении промежуточных зон. Ширина промежуточных зон и зон трещин составляет от 1 до 1,5 м. Количество зон техногенной трещиноватости зависит от уровня напряженного состояния, а расстояние от контура выработки до последней зоны составляет от 5 до 11 м [6].

В работах В.Н. Ревы [6, 26] исследованы закономерности зонального деформирования и разрушения массива вокруг подготовительных выработок, проведенных комбайновым способом по пласту угля с присечкой вмещающих пород при значениях  $\gamma_{п} H/\sigma_c = 0,7-1,2$  ( $\gamma_{п}$  – объемный вес пород,  $H$  – глубина заложения выработки,  $\sigma_c$  – предел прочности на одноосное сжатие). Деформации пород определялись по глубинным реперным станциям, а наличие зон трещин устанавливалось в забое проводимой вприсечку через четыре месяца выработки. Установлено наличие четырех зон трещин отрыва, ширина их составляет от 0,2 до 1,8 м и закономерно уменьшается вглубь массива. Ширина промежуточных зон составляет 1–2,3 м и закономерно возрастает в том же направлении. Величина раскрытия трещин составила 1,5–5 мм, расстояние между ними – 0,10–0,25 м. На контакте крепи с массивом породы уплотняются. По положению угольного пласта четко прослеживаются сдвиговые перемещения массива вокруг выработки.

Как установлено в исследованиях А.Ф. Морозова, периодическая деформационная структура массива вокруг выработок может существенно изменяться при их надработке [1, 10, 11]. Так, выявлено наличие разорванных (спиралевидных) деформационных зон вокруг выработки в зоне надработки, движение

по массиву участков относительного сжатия и растяжения, наличие «мертвых» деформационных зон – недеформирующихся участков массива. Деформации контура выработки могут определяться как разрыхлением, так и поворотом и сдвижением больших блоков пород.

Периодическое распределение техногенных трещин в массиве впереди очистного забоя установлено в ЮАР на глубине 2300 м в работах G.R. Adams, A.J. Jager в 1980 г. [28]. В исследованиях, проведенных перископическим методом, установлено наличие, по крайней мере, четырех зон трещин шириной 0,3–1,3 м, разделенных промежуточными, относительно ненарушенными зонами. Эти исследования, равно как и вышеупомянутые работы российских ученых, проведены практически одновременно и независимо. В промежуточных зонах массива установлено наличие высоких сжимающих напряжений, что является причиной дискования керна и закономерного уменьшения толщины дисков от краев к середине зон. Здесь же отмечено свойство зон трещиноватости и промежуточных, без видимых трещин, зон меняться местами при движении забоя. Отмечается также отрывной характер трещин.

В лабораторных экспериментах с сильно сжатыми геоматериалами, где моделировался ослабленный выработками массив, также установлены новые результаты, свидетельствующие о зональном характере его разрушения. Большая серия экспериментов была проведена в 1980-х годах в лаборатории «Физического моделирования» ВНИМИ (Ленинград) М.Ф. Шклярским под руководством Ф.П. Глушихина. Исследования проводились на плоских и объемных моделях из эквивалентных материалов [2, 3, 28]. Методика экспериментов предусматривала учет трещиноватости массива и его блочное строение. Исследования на плоских моделях позволили установить образование вокруг выработок одиночных замкнутых трещин отрыва, повторяющих очертание контура этих выработки (рис. 5). Образованные трещинами контуры отделены друг от друга участками деформированного массива. Число кольцевых трещин определяется величиной действующих напряжений. Появление охватывающих выработку

трещин начинается при напряжениях, превышающих предел прочности материала модели на одноосное сжатие.

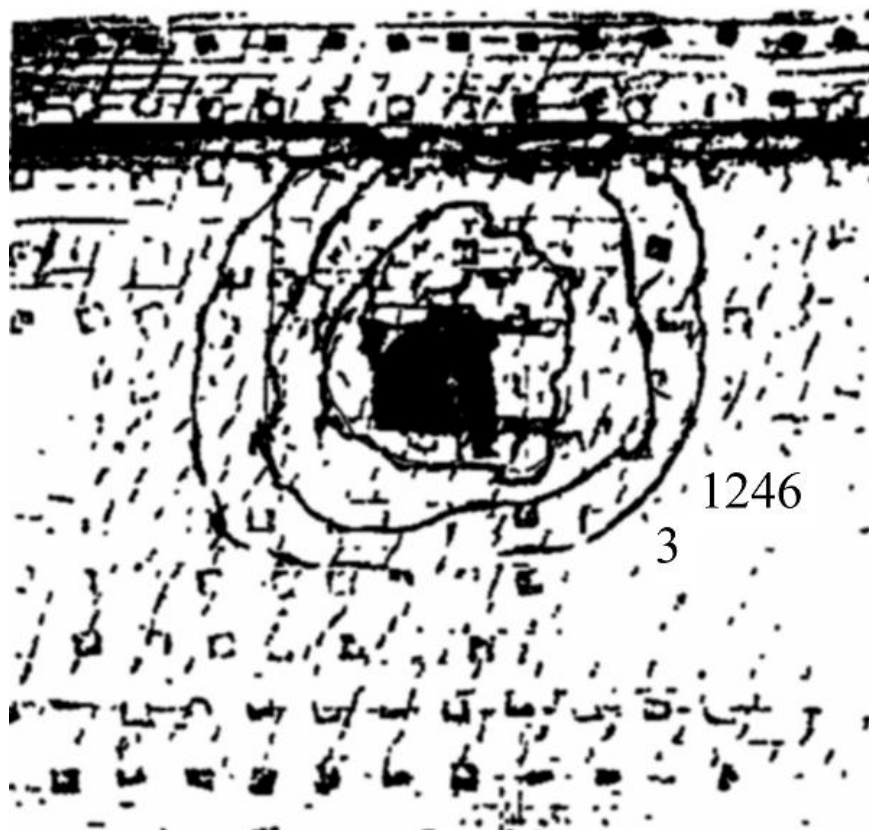


Рис. 5. Кольцевая трещинная структура массива вокруг выработки в плоской модели по данным [5]

Таким образом, зональный характер отрывного разрушения сильно сжатого массива вокруг подземных выработок был установлен в обширных натуральных и лабораторных экспериментальных исследованиях в России и за рубежом. Зональная структура разрушения носит кольцевой замкнутый вокруг выработки характер.

Основными свойствами зональной структуры разрушения являются повторение зонами контура выработки, чередование относительно ненарушенных (промежуточных) и разрушенных участков массива, увеличение числа зон с ростом глубины, отрывной характер трещин в них, угловое распространение трещин в зонах разрушения – и квазирadiaльное в промежуточных зонах, протя-

женный характер зон в радиальном направлении, закономерное изменение радиальной протяженности зон от контура выработки в глубь массива и другие.

Установленные закономерности деформирования и разрушения образцов горных пород и массивов вокруг подземных выработок не могут быть описаны с позиций классической механики сплошных сред [4, 22], требуются специальные исследования и обобщающая эти явления концепция, позволяющая проводить целенаправленное углубление представлений теории о процессах, происходящих в предразрушающей области нагружения геоматериалов.

**Закономерности формирования и развития  
диссипативных мезотрещинных структур периодического типа  
в образцах сильно сжатых горных пород: эксперимент и теория**

Как показывают исследования, трещинообразование является единственным фактором, сопровождающим все отмеченные различными авторами аномальные деформационные эффекты в образцах горных пород в предразрушающей области нагружения. Это позволяет сформулировать гипотезу обусловленности аномального характера деформирования образцов горных пород при одноосном сжатии процессом формирования и развития макротрещин отрыва. Гипотеза сформулирована в следующем виде: характер деформирования образцов горных пород по их периметру и по высоте при одноосном сжатии относится к осцилляционному, периодическому типу, что обусловлено возникновением очага разрушения, создающего локальную неоднородность в образце, следствием чего является чередование по его высоте и периметру участков с эффектами относительного уплотнения и разуплотнения.

В основу исследований положена двухстадийная модель формирования макротрещин, заключающаяся в том, что после периода рассеянного микрорастрескивания наступает стадия формирования очага макроразрушения, после чего – стадия формирования и развития макродефекта.

Разработка методики деформационных томографических исследований образцов сильно сжатых горных пород произведена на основе программы экспериментальных исследований геодинамических полей и процессов в массиве горных пород удароопасных месторождений Дальнего Востока и компьютерной модели разрушения горных пород, учитывающей закономерности формирования и развития очага разрушения во времени и пространстве.

Нагружение образцов производится сервоуправляемым нагрузочным устройством MTS-816 по схеме, предусматривающей два основных режима: предразрушающего нагружения и его же за пределом прочности. Для проверки гипотезы осцилляционного, периодического типа характера деформирования образцов горных пород по их периметру и по высоте при одноосном сжатии разработана методика исследования, основанная на применении тензорезисторного способа измерения и отличающаяся возможностью определения локальных деформаций как в центральной части образца, так и по его высоте.

Условия нагружения и торцовые условия принимаются такими же, как и в случае исследования закономерностей деформирования образцов при сжатии с учетом влияния близости торцов ВНИМИ [5]. Исследования проводились на скальных породах различного типа, включая дациты, гранодиориты, граниты-порфириты и другие. Тензорезисторы наклеивались по всему периметру образца в точках от четырех до восьми сторон, от одного до трех рядов датчиков продольных и поперечных деформаций на каждой. Для обеспечения сохранности проволочных выводов была разработана специальная схема их крепления на образце. Показания тензорезисторов фиксировались при помощи компьютерной программы устройства УИУ-2000.

Исследования проведены в лаборатории геодинамики ДВГТУ. На рис. 6 показана лаборатория во время испытаний. Всего было испытано 4 серии по 10 образцов в каждой. Исследования проводились при одноосном сжатии образцов горных пород по многоточечной схеме измерений от 8 до 48 датчиками (рис. 7).



Рис. 6. Нагрузочная система MTS-816

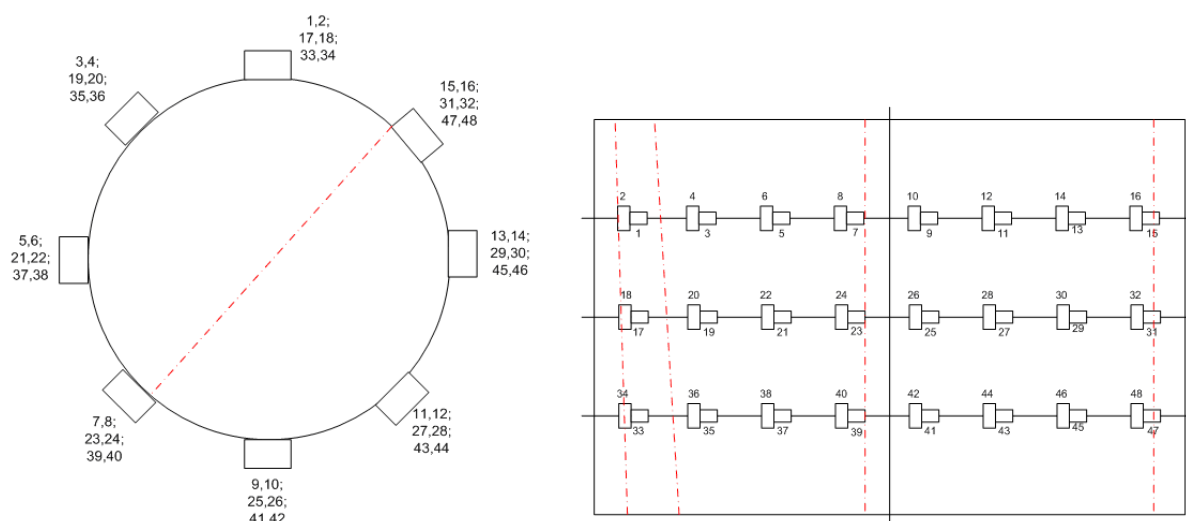


Рис. 7. Схема измерений и направления разрывных трещин

Проведенные исследования деформирования образцов горных пород полностью подтвердили выдвинутую гипотезу осциллирующего характера приращений объемных деформаций при одноосном сжатии в предразрушающей области нагружения. На рис. 8 показан образец перед испытанием и раз-

рушенный, а на рис. 9 – характер разрушения отрывом. Деформационные кривые линейных деформаций для центральной части образца показаны на рис. 10. Хорошо видно, что в предразрушающей стадии нагружения наблюдается выполаживание кривых с уменьшением на этом участке модулей деформаций в 1,5–3 раза. Отмечаются также случаи реверса линейных деформаций.

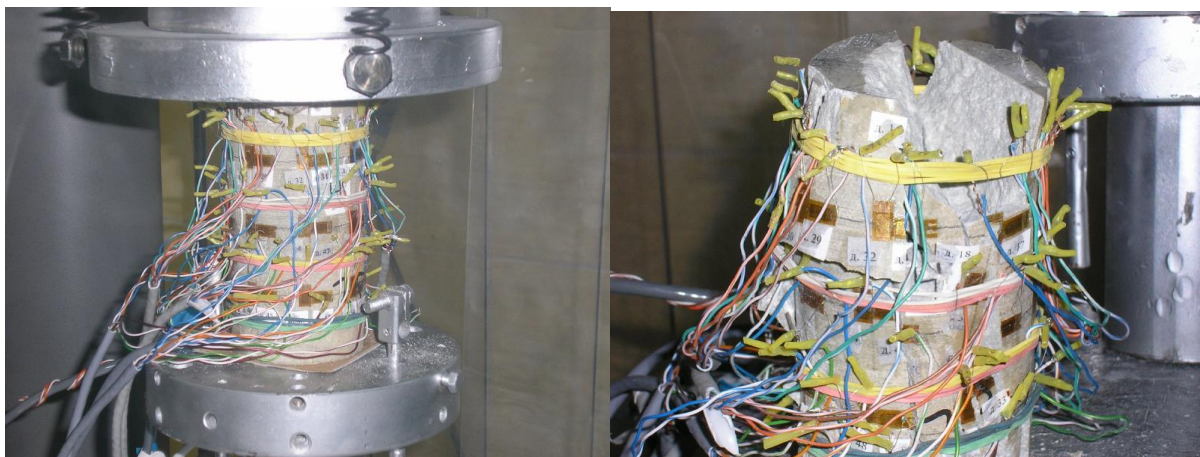


Рис. 8. Образец до (1) и после (2) испытаний



Рис. 9. Характер разрушения образца дацита (№ 3)



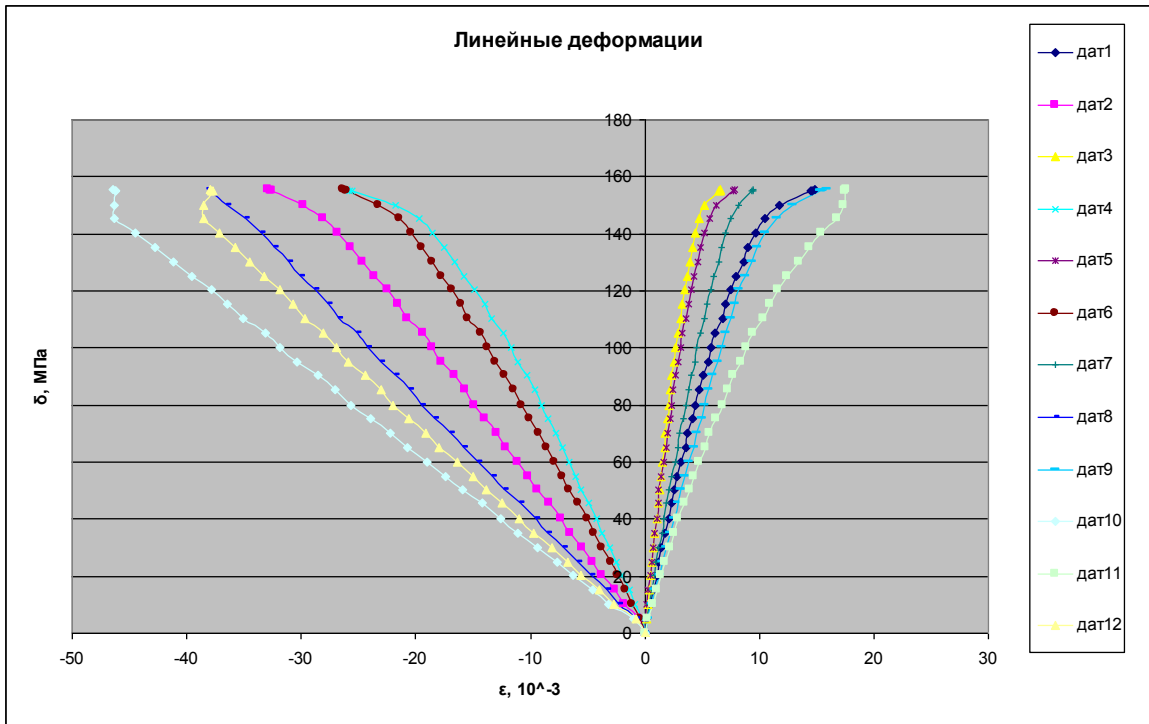


Рис. 10. Закономерности деформирования образцов горных пород в предразрушающей стадии нагружения

Кривые объемных деформаций показаны на рис. 11. Здесь также отчетливо выделяются U- и S-образные деформационные кривые.

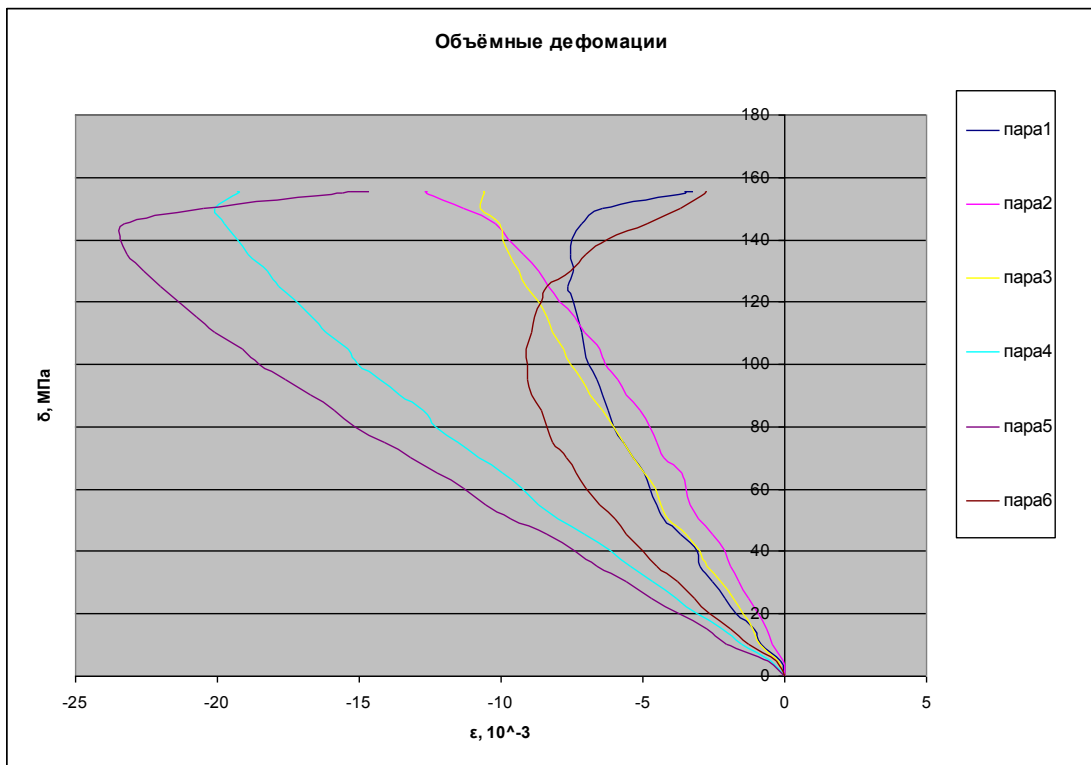


Рис. 11. Закономерности объемного деформирования в центральной части образцов горных пород в предразрушающей области нагружения



Характерные этапы объемного деформирования образцов показаны на рис. 12. Приращения объемных деформаций достигают максимума на начальных этапах нагружения и постепенно уменьшаются до достижения порога дилатансии по всем точкам измерения. После этого происходит разделение участков деформирования на те, где объем продолжает увеличиваться значительно интенсивнее, чем на предыдущих стадиях нагружения, и где объем пород начинает, напротив, уменьшаться.

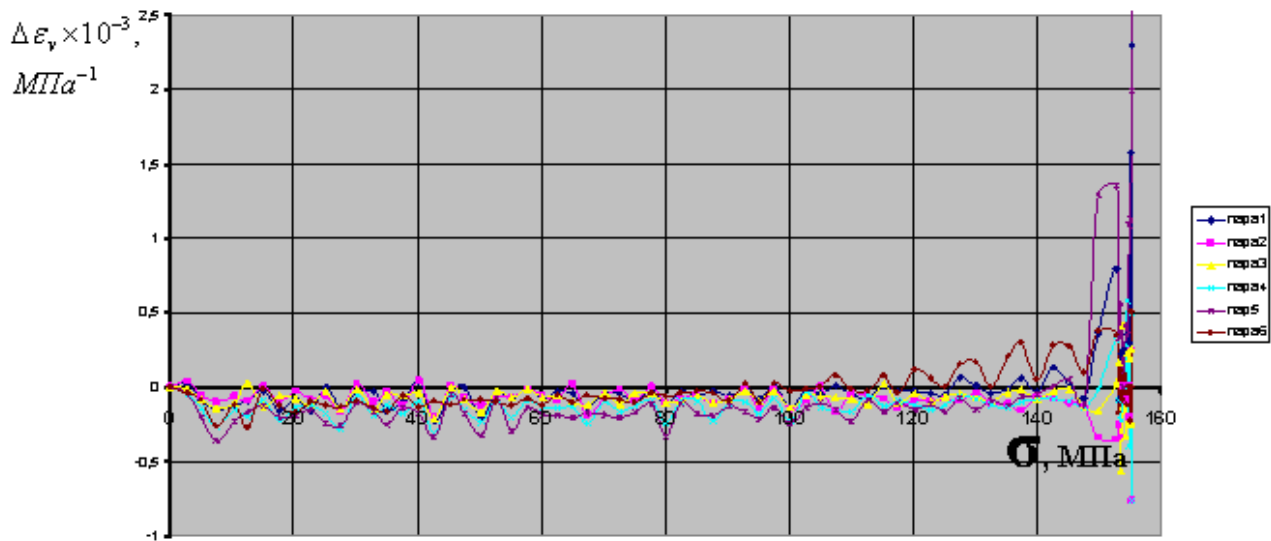


Рис. 12. Основные этапы деформирования образца горных пород при одноосном сжатии: пары 1-6 соответствуют положениям датчиков (17-18)-(31-32) рис.7

Этот момент соответствует формированию дефектно деформационной структуры и обусловлен локализацией новообразованных мезодефектов в очаговой области. На рис. 13 показана типичная картина деформирования образца горной породы в предразрушающей области нагружения. После формирования дефектно-деформационной мезоструктуры наступает процесс ее развития, где вначале в областях относительного увеличения объема продолжают развиваться дилатансионные процессы, а в областях относительного уплотнения, напротив, – процессы контракции. Затем наступает непродолжительный период стабилизации, за которым следует этап подготовки макроразрыва, завершающийся скачкообразной сменой знака приращения объемных деформаций во всех частях структуры. После этого происходит макроразрушение.

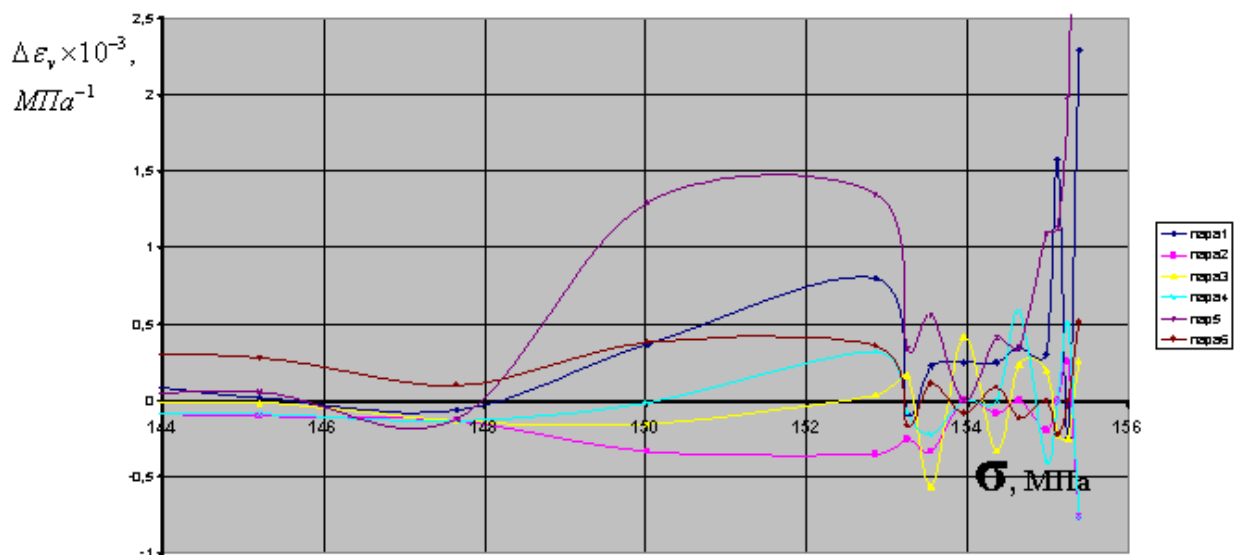


Рис. 13. Закономерности деформирования образца горной породы в предразрушающей области нагружения: пары 1-6 соответствуют положениям датчиков (17-18)-(31-32) рис.7

Отметим, что каждый из этапов деформирования имеет однозначную интерпретацию и фиксируется достаточно точно, что позволяет использовать соответствующие характеристики в качестве надежных (однозначно читаемых) предвестников разрушения.

Математическое моделирование процессов деформирования в предразрушающей области нагружения должно проводиться с применением моделей механики дефектных сред, основывающихся на представлении горной породы в состоянии сильного сжатия дефектной средой, находящейся в условиях, далеких от состояния термодинамического равновесия, где в общем случае не выполняются условия совместности упругих деформаций. Возникновение в этом случае компенсирующего поля самоуравновешенных напряжений обуславливает состояние зависимости значений напряжений и деформаций в образце горной породы от угла [4].

Рассмотрим модель механики дефектных сред образца горной породы при одноосном сжатии. Деформационные аномалии появляются в образце горной породы при достижении нагрузкой  $P$  некоторых критических значений  $P_*$ . В первом приближении это значение напряжений, соответствующее порогу ди-

латансии. Если  $P$  меньше  $P_*$ , то напряженно-деформированное состояние образца описывается законом Гука [31]

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left( \varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} \right), \quad (1)$$

где  $E$  – модуль Юнга,  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Кроме того, при  $P$  меньше  $P_*$  уравнения равновесия для образца горной породы в цилиндрических координатах имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{r\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}}{r} &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_{r\varphi}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\varphi\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \sigma_{\varphi z}}{\partial z} + \frac{2\sigma_{r\varphi}}{r} &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\varphi z}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rz}}{r} &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

а граничные условия задачи о напряженно-деформированном состоянии цилиндрического образца при одноосном сжатии записываются как

$$\begin{aligned} \sigma_{zz} \Big|_{z=\pm h} &= -P, \quad \sigma_{zr} \Big|_{z=\pm h} = 0, \quad \sigma_{z\varphi} \Big|_{z=\pm h} = 0, \\ \sigma_{rr} \Big|_{r=R} &= 0, \quad \sigma_{r\varphi} \Big|_{r=R} = 0, \quad \sigma_{rz} \Big|_{r=R} = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Из экспериментальных исследований видно, что аномальные реверсивные деформации в области нагружения, где  $P$  больше  $P_*$ . (обозначим эти деформации  $E_{ij}$ ), совпадают по порядку величин с докритическими деформациями  $\varepsilon_{ij}$  в области  $P$  меньше  $P_*$ . Это позволяет связать напряжения  $\Pi_{ij}$ , соответствующие деформациям  $E_{ij}$ , с  $E_{ij}$ , линейными соотношениями, аналогичными по своей алгебраической структуре закону Гука для условий области, где  $P$  меньше  $P_*$  [31]:

$$\Pi_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left( E_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} E_{kk} \delta_{ij} \right), \quad (4)$$

где  $E$  – модуль Юнга,  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Образование периодических мезотрещинных структур влечет за собой появление некоторого нового поля напряжений  $T_{ij}$ , которое в общем случае зависит от типа рассматриваемых трещинных дефектов. Поскольку образец находится в равновесии, то силы, определяемые полем  $T_{ij}$ , должны быть скомпенсированы, поэтому часто они называются самоуравновешенными. В качестве компенсирующего поля выступает  $\Pi_{ij}$ . При этом полное поле напряжений  $\Sigma_{ij}$  внутри образца равно:

$$\Sigma_{ij} = \Pi_{ij} + T_{ij}. \quad (5)$$

Оно удовлетворяет уравнениям равновесия (2) и краевым условиям (3). В свою очередь для полей  $\Pi_{ij}$  и  $T_{ij}$  можно записать соответствующие уравнения равновесия:

$$\frac{\partial \Pi_{ij}}{\partial x_j} = 0, \quad \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} = 0, \quad (6)$$

и граничные условия:

$$\Pi_{ij} n_i |_{\partial V} = -T_{ij} n_i |_{\partial V}. \quad (7)$$

Причем

$$T_{ij} = 2\sigma_0 l^2 \varepsilon_{ipq} \varepsilon_{jmk} \frac{\partial \Gamma_{qm,p}}{\partial x_k}, \quad (8)$$

где  $\varepsilon_{ipq}$  – символ Леви–Чивиты, постоянные  $\sigma_0$ ,  $l$  имеют размерность напряжения и длины соответственно. Конкретный вид функций  $\Gamma_{qm,p}$  зависит от типа дефектной структуры, при этом необходимо анализировать предысторию образования дефектов и диссипативные процессы в материале.

Постановка задачи для уравнений (5) состоит в построении такого упругого поля  $\Pi_{ij}$ , чтобы соответствующие ему деформации  $E_{ij}$  совпадали с измеренными значениями на границе в дискретном наборе точек.

Поле упругих напряжений  $\Pi_{ij}$  и деформаций  $E_{ij}$  можно связать линейными соотношениями

$$\Pi_{ij} = A(E_{ij} + BE_{kk}\delta_{ij}) \quad (9)$$

с некоторыми коэффициентами  $A$ ,  $B$ .

Без ограничения общности параметры  $A$ ,  $B$  можно выбрать как в теории упругости:

$$A = \frac{E}{1+\nu} = 2\mu, \quad B = \frac{\nu}{1-2\nu}, \quad (10)$$

где  $\mu$  – модуль сдвига.

Так как уравнения (5) являются линейными, то представим поле  $\Pi_{ij}$  в виде суммы классического решения  $\sigma_{ij}$  и некоторого поля  $\pi_{ij}$ :

$$\Pi_{ij} = \sigma_{ij} + \pi_{ij}. \quad (11)$$

Поскольку решение строится в предразрушающей области, то уровень нагрузки  $P = P_*$  является отсчетным, поэтому в формуле (3) для  $\sigma_{ij}$  следует полагать  $\delta P = P - P_*$  вместо  $P_*$ . Дополнительно потребуем, чтобы первый инвариант  $\pi_{kk}$  обращался в нуль. Тогда тензор  $\pi_{ij}$  связан с соответствующим тензором деформации соотношением

$$\pi_{ij} = \mu \left( \frac{\partial a_i}{\partial x_j} + \frac{\partial a_j}{\partial x_i} \right), \quad (12)$$

где  $a_i$  – компоненты вектора перемещений, отсчитываемые от уровня нагрузки  $P = P_*$ .

Компоненты  $a_i$  ( $i=1,2,3$ ) определяются из уравнений равновесия, которые в цилиндрической системе координат имеют вид:

$$\Delta a_r - \frac{a_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial a_\varphi}{\partial \varphi} = 0, \quad \Delta a_\varphi - \frac{a_\varphi}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial a_r}{\partial \varphi} = 0, \quad \Delta a_z = 0. \quad (13)$$

Разработанная модель позволяет решать граничные задачи для образцов и массива сильно сжатых горных пород. После решения системы (12) в виде рядов Фурье по тригонометрическим функциям и проведения численных расче-

тов для условий эксперимента с образцом при значениях параметров модели:  $\nu = 0,26$ ,  $E = 1,7 \cdot 10^4$  МПа,  $x = 0,5 \cdot \pi$ ,  $h = 5\text{см}$ ,  $R = 2,5\text{см}$ , получаем значения коэффициентов рядов:

$$\begin{aligned} A_{21}^{(1)} &= -3519 \cdot 10^{-6}, & A_{41}^{(1)} &= -29410 \cdot 10^{-6}, & A_{11}^{(2)} &= -1167 \cdot 10^{-6}, \\ B_{21}^{(1)} &= -700 \cdot 10^{-6}, & B_{41}^{(1)} &= 885 \cdot 10^{-6}, & B_{11}^{(2)} &= 1143 \cdot 10^{-6} \end{aligned} \quad (14)$$

Вычисляя теперь величины деформаций, соответствующие эксперименту, и отображая их в сравнении с данными этого эксперимента в табл. 1, можем видеть, что при полном качественном совпадении результатов аналитических и экспериментальных исследований максимальное количественное расхождение значений продольных деформаций не превышает 19%. Таким образом, удовлетворительные результаты математического моделирования позволяют установить механизм явления осцилляционного периодического деформирования сильно сжатых образцов горных пород. Он заключается в том, что в условиях сильного неравнокомпонентного сжатия и обусловленного этим мезосдвиговым разрушением на неоднородностях среды напряжения в образце приобретают осцилляционный периодический характер, что имеет следствием развитие на локальных участках действия максимальных нормальных тангенциальных напряжений очагов концентрации взаимодействующих мезодефектов, а в окрестности очагов – образование относительно разгруженных участков, где деформации приобретают реверсивный характер, так и относительно уплотненных участков.

Установление механизма явления осцилляционного, периодического типа деформирования сильно сжатых образцов горных пород позволяет сформулировать систему деформационных предвестников разрушения, что имеет важное значение для прогноза геодинамических явлений в массиве горных пород и земной коре.

Таблица 1

**Результаты сравнения данных теоретических и экспериментальных исследований**

Параметр	Величина продольных деформаций в местах расположения датчиков по схеме через 90 градусов							
	1		2		3		4	
	Эксп.	Теор.	Эксп.	Теор.	Эксп.	Теор.	Эксп.	Теор.
Продольные деформации, $10^{-6}$	-1067	-899	704	704	-899	-899	679	679
Отклонение, %	18,7		0,0		0,0		0,0	

**Закономерности формирования и развития диссипативных мезотрещинных структур периодического типа в породах горных массивов вокруг подземных выработок: эксперимент и теория**

Исследование зональной структуры разрушения массива в натуральных условиях осложняется большими трудностями обеспечения требований соблюдения чистоты эксперимента: отсутствия влияния соседних выработок и очистных работ, однородности массива в окрестности выработки как со стороны почвы, так и со стороны кровли, наличие водопритоков в выработку и других. Поэтому выбор мест установки наблюдательных станций диктуется не только конкретной производственной ситуацией и заданиями соответствующих НИР, но и условиями максимально возможного исключения влияния побочных факторов на результаты наблюдений.

Исследование закономерностей зонального деформирования и разрушения горных пород в массиве вокруг одиночных капитальных выработок, пройденных в однородных породах, было проведено на больших глубинах в условиях рудника Николаевский (г. Дальнегорск). Методика проведения экспериментальных исследований, проводимых с использованием глубинных реперов, предусматривала бурение глубоких скважин в борта и кровлю выработки непо-

средственно после ее проведения. Условия установки наблюдательных станций, методы обработки результатов наблюдений соответствовали ранее проводимым исследованиям [4].

Представлены результаты исследований и показан зональный характер деформирования массива вокруг подземных выработок в условиях больших глубин (рис. 14).

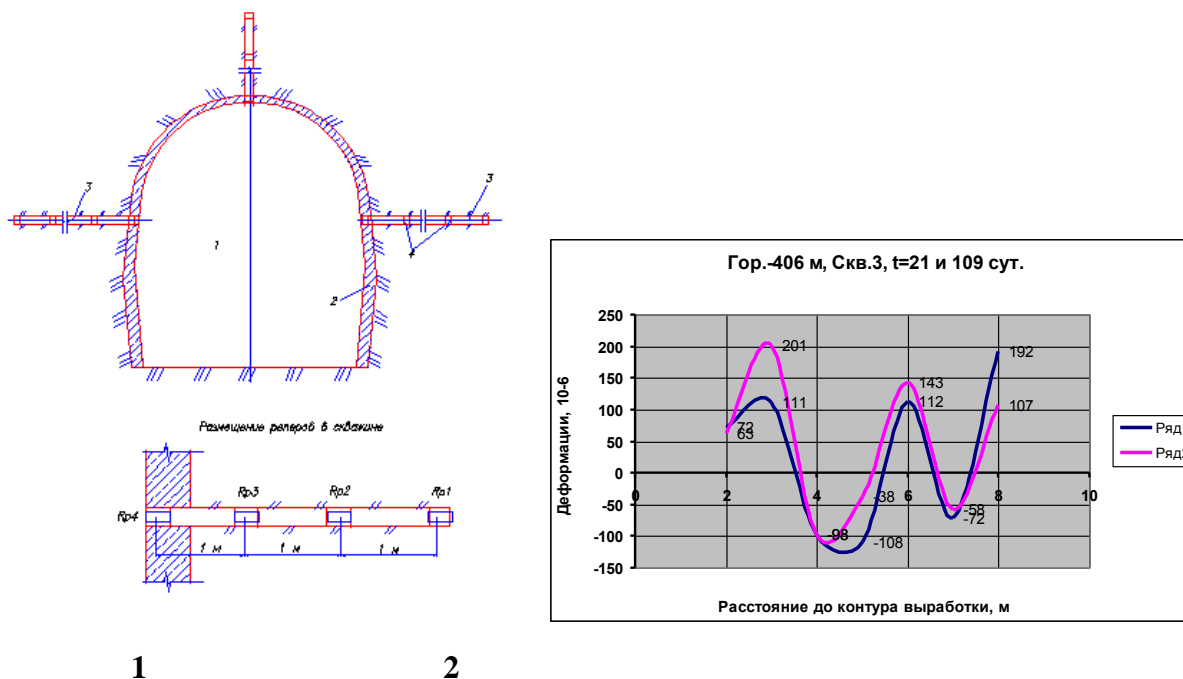


Рис. 14. Закономерности деформирования сильно сжатых горных пород вокруг подземных выработок (р. Николаевский): 1 – схема установки станций, 2 – зависимость величины деформации от расстояний до контура

Хорошо виден периодический характер деформирования массива, где зоны относительного уплотнения и разуплотнения чередуются с удалением от контура выработки. Зональный характер деформирования позволяет соотнести появление макроструктуры зонального разрушения с подготовкой на уровне развития мезотрещинной структуры массива в условиях высоких действующих напряжений.

Проведены также исследования закономерностей зонального разрушения горных пород в массиве вокруг выработок, подвергшихся воздействию горного удара. Эти исследования вызывают как самостоятельный интерес, так и служат прояснением причин зонального разрушения, поскольку горный удар связан с



интенсивным воздействием на окружающий массив. Исследования были проведены в условиях Южного месторождения (Приморье) по результатам бурения скважин и анализа выбуренного керна. Рудные тела являются типичными жильными образованиями, несущими свинцово-цинково-серебряную минерализацию. Основное промышленное рудное тело—жила № 4, которая прослеживается с поверхности по простиранию на 1000 м и по падению – на 520 м. Жила сложена массивными полосчатыми сульфидными и кварцево-карбонатно-сульфидными рудами. Мощность жилы колеблется в пределах от 0,05 м до 3,75 м. Вмещающие породы представлены переслаиванием прочных песчаников и диоритов. 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 100–200 м. Объектами динамических проявлений являются целики, оставленные для охраны выработок и пересекаемые плоскостями тектонических нарушений [27]. Здесь, как и в ряде других случаев, мы имеем незначительные глубины разработки, на которых, тем не менее, происходят геодинамические проявления горного давления. Это еще раз подчеркивает условность понятия «большая глубина» и предпочтительность введения термина «сильное сжатие» массива.

Методика проведения исследований предусматривала бурение вееров скважин диаметром 42 мм по нескольким сечениям вдоль рудного штрека (рис. 15) и количественной оценке состояния массива по выбуренному керну. Выход буровой мелочи рассматривался как факт наличия интенсивной трещиноватости в массиве, а дискование керна свидетельствовало о наличии повышенных сжимающих напряжений [4]. Всего было пробурено 4 веера скважин. Расстояния вееров до очага горного удара составило соответственно 20, 33, 41 и 140 м. Выход керна составил от 78 до 100%. Общая длина скважин составила 149 м, средняя длина – 8,3 м. Горные работы в течение периода проведения наблюде-

ний в окрестности скважин не проводились. Фиксировались интервалы выхода буровой мелочи, интервалы дискообразования по длине скважины, количество дисков, их толщина и форма, а также тип пород и руд, пересекаемых скважиной.

Достоверность результатов эксперимента обеспечивал 4-й веер скважин на расстоянии 140 м от центра горного удара, поскольку существенное влияние динамических проявлений горного давления на таких расстояниях маловероятно [4]. Кроме того, была выбрана одиночная выработка, в окрестности которой не проводилось горных работ.

В результате исследований установлен эффект зонального разрушения массива горных пород вокруг подвергшейся воздействию горного удара одиночной выработки (рис. 15). Зоны интенсивной трещиноватости в окрестности выработки строго чередуются с относительно монолитными участками массива. Дискование керн приурочено, как правило, к промежуточным зонам. Особенно интенсивно этот процесс происходит в массиве рудных тел. В породном массиве дискование керн менее интенсивно. Дискование керн в промежуточных зонах свидетельствует о наличии здесь больших сжимающих напряжений. Таким образом, в целом промежуточная зона находится в состоянии сильного сжатия.

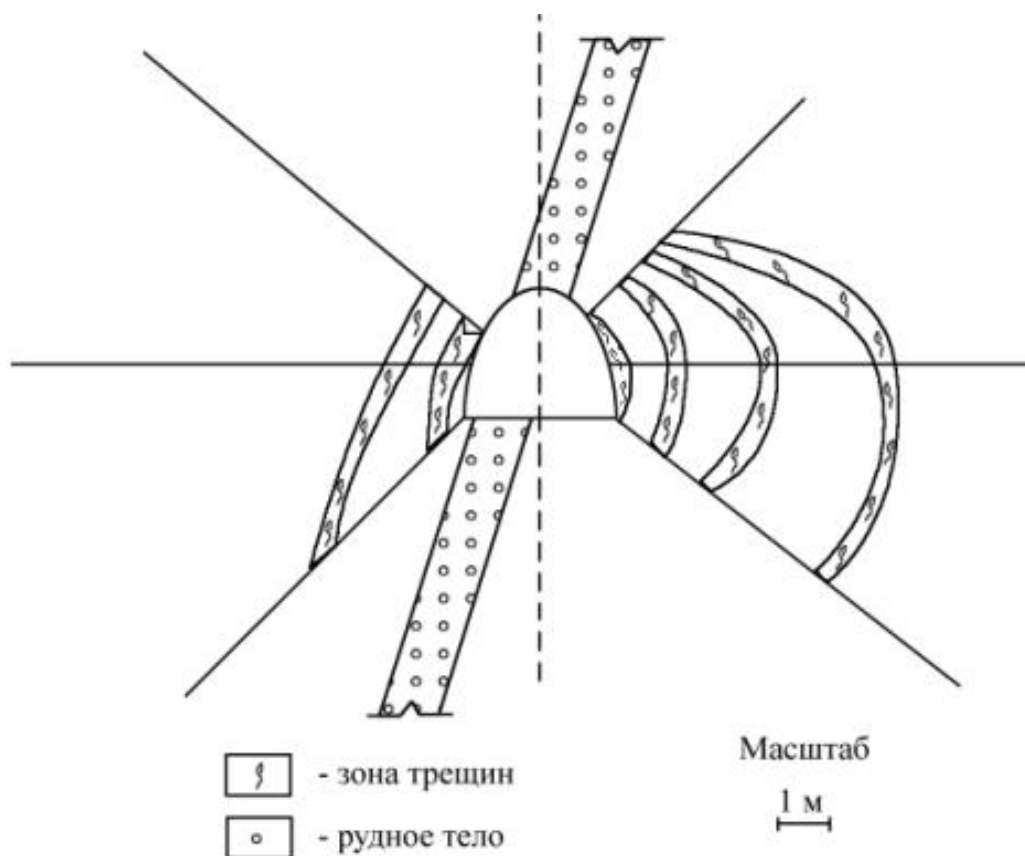


Рис. 15. Характер зонального разрушения массива вокруг выработки, подвергшейся воздействию горного удара

Интенсивность как трещинообразования, так и дискообразования зависит от угла бурения скважин. Это объясняется особенностями распределения напряжений в массиве, обусловленными формой выработки и положением скважин относительно рудной жилы.

Дальнейший анализ проведен с учетом этих закономерностей. Установлено, что количество зон трещиноватости уменьшается вдоль выработки с удалением от центра горного удара с трех до одной, а суммарная протяженность участков трещинообразования при этом уменьшается (рис. 16). Эти закономерности свидетельствуют о четкой зависимости количества зон и параметров структуры разрушения от уровня действующих в массиве напряжений.

На рис. 17 приведены закономерности изменения радиальной протяженности разрушенных зон и промежуточных сжатых зон с удалением от контура сечения выработки. Радиальная протяженность разрушенных зон убывает с

удалением от контура выработки, а радиальная протяженность промежуточных зон – возрастает. Таким образом, исследование закономерностей разрушения массива горных пород вокруг подземных выработок, подвергшихся воздействию горного удара, показывает, что оно носит зональный характер. Параметры зональной структуры разрушения, такие как радиальная протяженность и количество зон трещин, а также радиальная протяженность и количество промежуточных зон, зависят от уровня напряженного состояния массива.

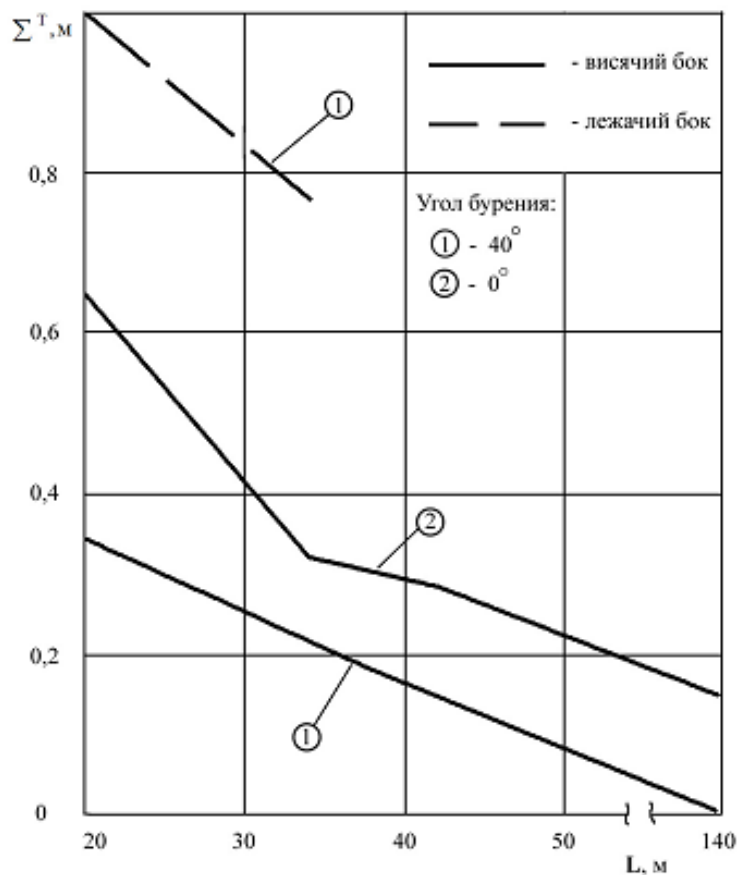


Рис. 16. Зависимость суммарной протяженности участков трещинообразования от расстояния до центра горного удара

Характерно, что по скважинам, находящимся на расстоянии 140 м от центра горного удара, нет зонального распределения трещиноватости. Следовательно, и появление самой зональной структуры разрушения массива обусловлено высокими напряжениями, вызванными горным ударом. Таким образом, гипотеза обусловленности реализации периодических трещинных структур в массиве вокруг выработок условиями сильного сжатия находит подтверждение.

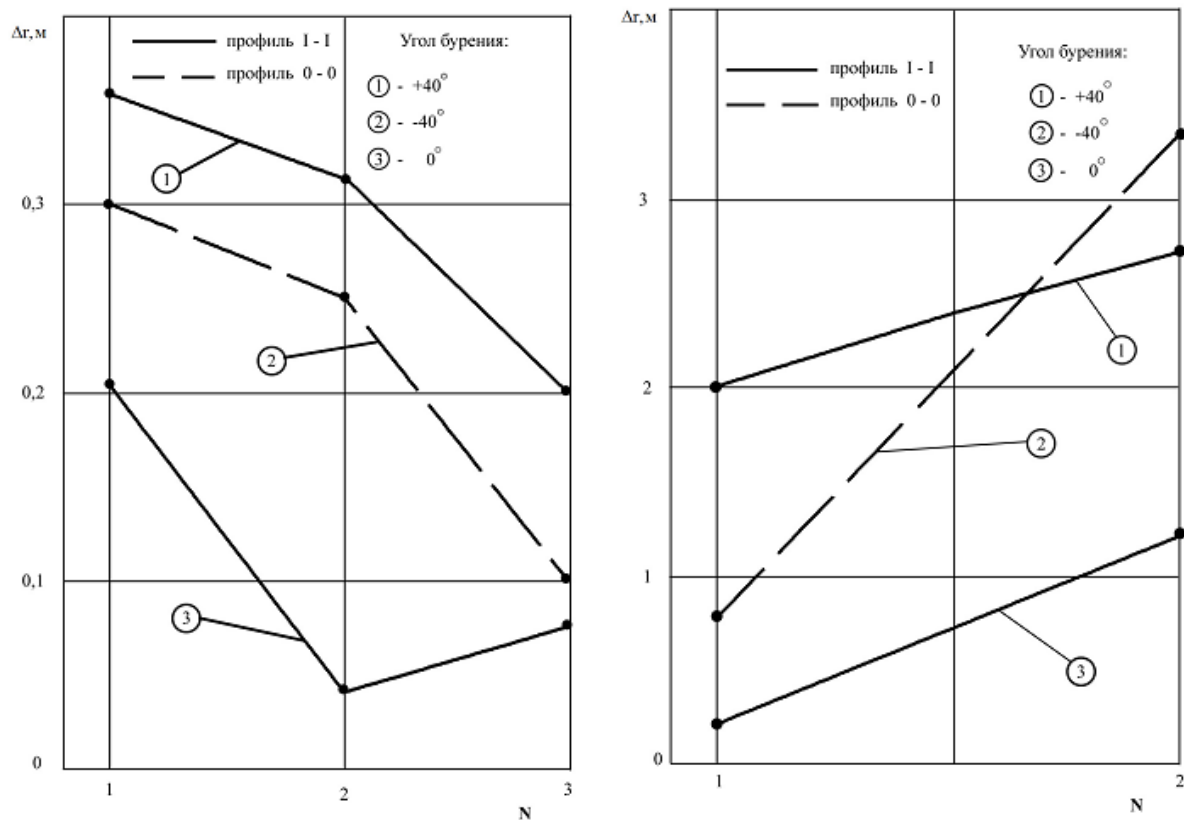


Рис. 17. Закономерности изменения радиальной протяженности зон от расстояния до контура выработки ( $N$  – номер зоны): а. – зоны трещин, б – промежуточные зоны

Теоретические исследования зонального разрушения массива горных пород вокруг горной выработки кругового сечения на большой глубине с использованием математической модели механики дефектных сред. Как и в случае с сильно сжатым образцом горной породы, рассмотрен массив на большой глубине, рассматриваемый как далекая от условий равновесия термодинамическая открытая система, где в общем случае не выполняются условия совместности упругих деформаций. Массив горных пород вокруг круговой выработки представлен невесомой плоскостью, нагруженной на бесконечности гравитационным напряжением и ослабленной круглым отверстием со свободным от нагрузок контуром, моделирующим круглую незакрепленную подземную выработку в условиях всестороннего сжатия. Краевая задача о распределении поля напряжений вокруг выработки рассматривается как плоская и стационарная. В качестве упрощений принимаются условия несжимаемости и гидростатичности нагружения на бесконечности, что с достаточной точностью воспроизводит

условия эксперимента. В силу полярной симметрии задачи уравнения равновесия имеют вид:

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r}(\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}) = 0, \quad \sigma_{r\varphi} = 0, \quad r_0 < r < \infty, \quad (15)$$

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

На контуре выработки ( $r = r_0$ ) внешние силы отсутствуют, а на бесконечности они заданы:

$$\sigma_{rr} = 0 \text{ при } r = r_0, \quad \sigma_{rr}, \sigma_{\varphi\varphi} \rightarrow \sigma_{\infty} \text{ при } r \rightarrow \infty, \quad (16)$$

где  $\sigma_{\infty} = \gamma_n \cdot H$ ,  $\gamma_n$  – удельный вес пород,  $H$  – глубина заложения выработки.

Массив горных пород в условиях сильного сжатия моделируется средой, где в общем случае не выполняются условия совместности деформаций. Адаптируя к нашей задаче неевклидовую модель механики сплошной среды, разработанную В.П. Мясниковым и М.А. Гузевым, вводим параметр дефектности  $R$ :

$$R = \frac{\partial^2 \varepsilon_{11}}{\partial x_2^2} - 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{12}}{\partial x_1 \partial x_2} + \frac{\partial \varepsilon_{22}}{\partial x_1^2} \neq 0, \quad (17)$$

$$R \equiv \frac{\partial^2 \varepsilon_{11}}{\partial x_2^2} - 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{12}}{\partial x_1 \partial x_2} + \frac{\partial \varepsilon_{22}}{\partial x_1^2} = \left( \Delta \varepsilon_{kk} - \frac{\partial^2 \varepsilon_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \right), \quad (18)$$

для представленной модели остаются справедливыми уравнения равновесия (15) и краевые условия (16). Вопросы, выполняется ли закон Гука при введении параметра дефектности  $R$  и какому уравнению удовлетворяет  $R$ , решаются на основе принципов неравновесной термодинамики. Если внутреннюю энергию задать в виде

$$\rho_0 U = \frac{E}{1+\nu} \left\{ \frac{\nu}{2(1-2\nu)} \varepsilon_{jj}^2 + \frac{1}{2} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{ij} \right\} - \frac{q}{4} R^2, \quad (19)$$

то компоненты напряжений и обратимых деформаций связаны классическим законом Гука

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left( \varepsilon_{ij} + \delta_{ij} \frac{\nu}{1-2\nu} I_1 \right), \quad I_1 = \varepsilon_{kk}. \quad (20)$$

Из (20) следует, что

$$\sigma = \frac{E}{1-2\nu} I_1. \quad (21)$$

В условиях плоской деформации  $\varepsilon_{zz} = 0$  из (20), (21) получаем, что

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{E} \left[ (1+\nu) \sigma_{ij} - \delta_{ij} \nu \sigma \right] \quad (*)$$

$$(1+\nu) \sigma_{zz} = \nu \sigma, \quad (22)$$

где  $\sigma = \sigma_{zz} + \sigma_{rr} + \sigma_{\varphi\varphi}$ , отсюда

$$\sigma_{zz} = \nu (\sigma_{rr} + \sigma_{\varphi\varphi}). \quad (23)$$

Из граничных условий (16) имеем

$$\sigma_{zz} \rightarrow 2\nu\sigma_{\infty}, \quad \sigma \rightarrow 2(1+\nu)\sigma_{\infty} \quad \text{при} \quad r \rightarrow \infty.$$

Подставим (23) в (22), тогда  $\sigma_{\varphi\varphi} + \sigma_{rr} = \frac{\sigma}{1+\nu}$ , или

$$\sigma_{\varphi\varphi} = \frac{\sigma}{1+\nu} - \sigma_{rr}. \quad (24)$$

Подставив в уравнение равновесия (15) получим

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{2\sigma_{rr}}{r} = \frac{\sigma}{1+\nu} \quad (25)$$

Подставляя в правую часть (21)  $\frac{\partial^2 \varepsilon_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}$ , вычисленное в (\*), получаем:

$$\Delta \sigma = \frac{E}{2(1-\nu)} R \quad (26)$$

с граничным условием  $\sigma \rightarrow 2(1+\nu)\sigma_{\infty}$  при  $r \rightarrow \infty$ .

Можно показать, что

$$\Delta^2 R - \gamma^2 R = 0, \quad \gamma^2 = \frac{E}{4q(1-\nu)} \quad (27)$$

$q$  – подгоночный параметр модели определяется из эксперимента.

Неклассическое расширение модели накладывает условие выделения решения для функции  $R$ . Это условие выбирается из соображения: на контуре выработки образуется зона разрушения, что предполагает для функции  $R$  наличие в точках контура экстремума. Допуская, что при зональном характере разрушения массива во всех остальных зонах процессы разрушения идут по одинаковому механизму, второе граничное условие для функции  $R$  определяем как ее экстремальность в первой зоне разрушения.

Окончательно граничные условия задачи записываются в следующем виде:

$$\frac{\partial R}{\partial r} = 0, \quad \text{при } r = r_0, \quad \frac{\partial R}{\partial r} = 0 \quad \text{при } r = r^*, \quad (28)$$

где  $r^*$  определяется из эксперимента.

Решение задачи дает компоненты напряжений в массиве вокруг горной выработки на большой глубине:

$$\sigma_{rr} = \sigma_{\infty} \left( 1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right) - \frac{E}{2(1-\nu^2)\gamma^{3/2}} \cdot \frac{1}{r} \left[ aJ_1(\sqrt{\gamma} \cdot r) + bN_1(\sqrt{\gamma} \cdot r) + cK_1(\sqrt{\gamma} \cdot r) \right],$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\varphi\varphi} = \sigma_{\infty} \left( 1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right) - \frac{E}{2(1-\nu^2)\gamma} \left[ aJ_0(\sqrt{\gamma} \cdot r) + bN_0(\sqrt{\gamma} \cdot r) - cK_0(\sqrt{\gamma} \cdot r) \right] + \\ + \frac{E}{2(1-\nu^2)\gamma^{3/2}} \cdot \frac{1}{r} \left[ aJ_1(\sqrt{\gamma} \cdot r) + bN_1(\sqrt{\gamma} \cdot r) + cK_1(\sqrt{\gamma} \cdot r) \right]. \end{aligned}$$

Закономерности зонального разрушения массива горных пород вокруг незакрепленных подземных выработок на большой глубине аналитически исследованы с применением рассмотренной модели



Аналитический расчет напряжений произведен для условий экспериментов (проведенных ВНИМИ в Донбассе) по определению закономерностей развития зональной структуры разрушения вокруг одиночных выработок. Результаты аналитического расчета компонент радиальных и тангенциальных напряжений  $\sigma_{rr}$  и  $\sigma_{\varphi\varphi}$ , а также функции дефектности  $R(r)$  приведены на рис. 18.

Хорошо виден осцилляционный характер как тангенциальных, так и радиальных напряжений вокруг выработки.

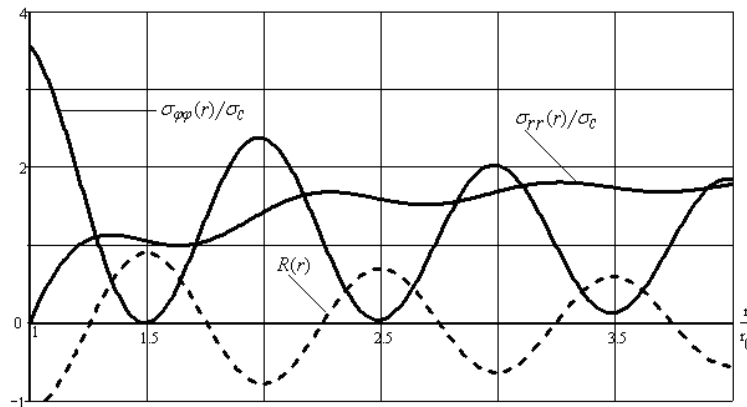


Рис. 18. Осциллирующий характер напряжений и  $R$  – функции в массиве вокруг подземной выработки

Воспользуемся критерием В.Н. Одинцева отрывного разрушения в условиях всестороннего сжатия в виде:

$$K_1 = (\pi l)^{1/2} (\gamma_1 \sigma_1^0 - \gamma_3 \sigma_3^0), \quad (29)$$

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;  $K_1$  – коэффициент интенсивности напряжений, МПа·м<sup>1/2</sup>;  $K_{1c}$  – трещиностойкость горных пород, МПа·м<sup>1/2</sup>.

Закономерности изменения относительных значений критерия разрушения показаны на рис. 19. 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.

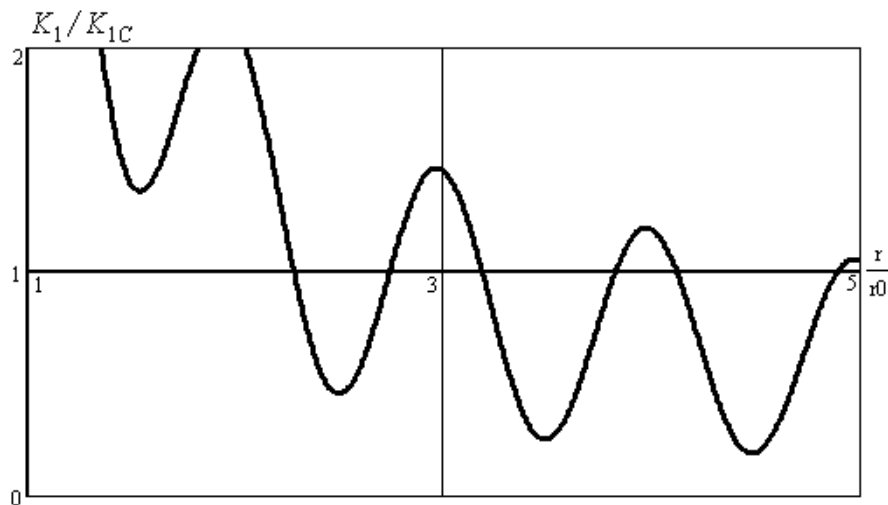


Рис. 19. Характер изменения относительных значений критерия отрывного разрушения при наличии 4-х зон разрушения в массиве вокруг выработки

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 ( $l, K_{1c}, \gamma_3/\gamma_1$ ) оказывают существенное влияние на характер зонального разрушения. Радиальная протяженность зон разрушения уменьшается при увеличении трещиностойкости породы. С уменьшением трещиностойкости породы зоны разрушения появляются при меньших относительных напряжениях, а расстояние последней зоны разрушения от контура выработки увеличивается.

Интенсивность нарушенности пород оказывает существенное влияние на параметры зональной структуры разрушения. При увеличении длины трещинных дефектов массива радиальная протяженность зон разрушения возрастает.

Радиальная их протяженность уменьшается при увеличении отношения  $\gamma_3/\gamma_1$  (рис. 20). Закономерности, установленные для мало прочных пород, оказываются справедливыми и для прочных пород.

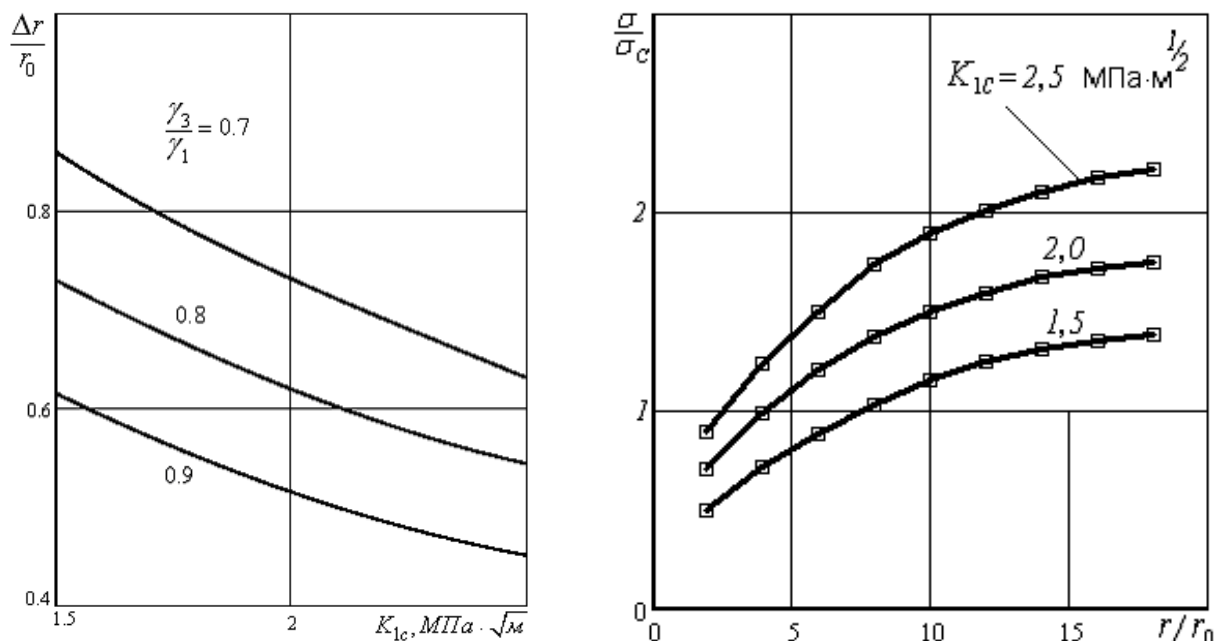


Рис. 20. Закономерности зонального разрушения массива вокруг подземной выработки: а – зависимость радиальной протяженности 1-й зоны разрушения от трещиностойкости породы; б – положения последней зоны разрушения при различных значениях трещиностойкости породы

Сравнительные значения границ зон разрушения, полученные в натурном эксперименте и теоретическом расчете для случая Донбасса, приведены в таблице 3. Можно отметить удовлетворительное совпадение этих результатов. Сравнение значений относительных критических напряжений образования зон разрушения, для этих же условий, также показывают допустимые расхождения результатов теории и эксперимента (см. табл. 2).

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 обусловленного этим развитием микросдвиговых разрушений на неоднородностях среды, напряжения в массиве приобретают осцилляцион-

ный 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 2

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

Положение дальней границы зоны, $r/r_0$	Элементы зональной структуры, № зоны разрушения (1–4)			
	1	2	3	4
Эксперимент [13],	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, $\sigma/\sigma_c$ [26]				
Эксперимент,	1,1	2,2	2,7	
Теория,	0,95	2,1	3,1	
Отклонение, %	-13,9	-4,5	14,8	

**Определение параметров математических моделей формирования и развития диссипативных мезотрещинных структур периодического типа по данным экспериментов на образцах горных пород**

Математическое описание явления зонального разрушения массива вокруг подземных выработок потребовало привлечения моделей механики дефектных сред, параметры которых не всегда возможно найти из экспериментов. Исследования, проводимые в натуральных условиях, позволяют определить эти параметры, но их проведение весьма затратно и не всегда возможно. Кроме того, часто требуется прогноз параметров зональной структуры разрушения на глубине, которая еще не доступна для ведения горных работ. В этой связи возникает необходимость определения параметров математических моделей по данным лабораторных экспериментов с образцами горных пород для прогноза

характера разрушения массива вокруг подземных выработок в сильно сжатых массивах горных пород.

Зональное разрушение характерно чередованием относительно монолитных и нарушенных участков массива вокруг выработок, пройденных в хрупких скальных породах. Такое же чередование нарушенных и относительно монолитных зон вокруг подземных выработок характерно для других месторождений (Норильска [24, ч. 1], Донбасса [11, 26], Дальнегорска и др. Построенная математическая модель, основанная на представлении массива дефектной средой, где в общем случае не выполняются условия совместности упругих деформаций и состояние которой далеко от равновесного, имеет два подгоночных параметра. Основываясь на данных натуральных экспериментов, можно отметить линейную связь  $\gamma$ -параметра с прочностными свойствами пород (рис. 21). Этот параметр связан с радиальной протяженностью зон, поэтому тесно коррелирует и с положением центра первой от контура зоны разрушения.

Значительно сложнее определить амплитудный параметр модели, поскольку он во многом определяется значением принятого критерия разрушения. Как и выше, мы будем использовать критерий отрывного разрушения при сжатии В.Н. Одинцева, основываясь на экспериментально установленном факте появления трещин отрыва в ближних от контура выработки зонах разрушения [12].

Кроме того, необходимо учесть представление массива горных пород иерархически упорядоченной блочной средой, что нашло устойчивое отражение в современной геомеханике [9, 13, 14]. Несмотря на наличие большого числа работ, в настоящее время трудно выделить нашедший достоверное подтверждение подход, связывающий размеры структурных блоков и структуры разрушения различного масштабного уровня. Поэтому будем руководствоваться следующими соображениями.

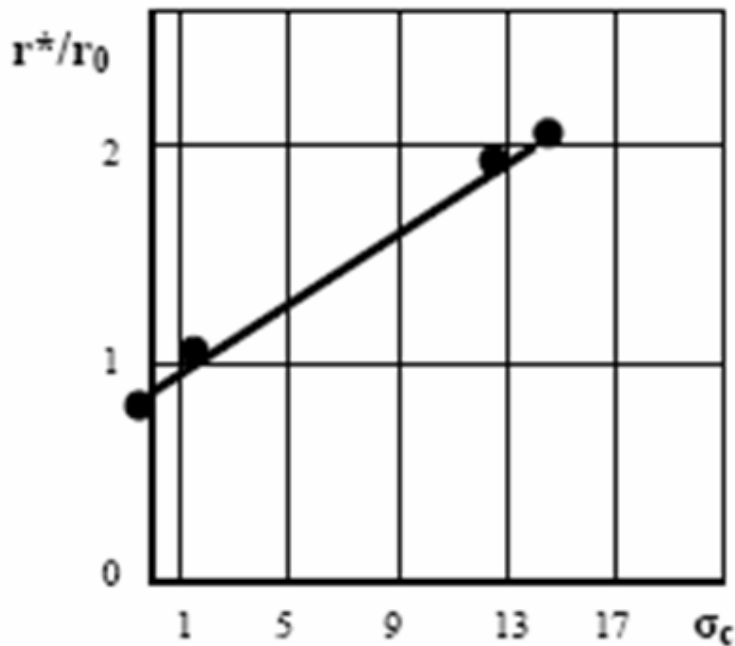


Рис. 21. Зависимость положения первой зоны разрушения от прочностных свойств пород

На уровне образца горной породы (диаметр 3–10 см, высота 6–20 см) структурными блоками выступают минеральные зерна, имеющие четко выделяющиеся в эксперименте границы, задающие неоднородность прочностных свойств горной породы этого иерархического уровня. Отношение размеров таких «блоков» (диаметр минерального зерна 0,1–0,5 мм) к размеру образца в целом равно примерно 1:100.

Размеры микротрещин для минерала составляют величину порядка размеров минерального зерна [12]. Размеры мезотрещин отрыва, возникающих при сжатии, изменяются в пределах от одного, до 5–10 диаметров зерна [7], а размеры критической длины макротрещин отрыва (предельной длины устойчивого макродефекта) можно получить из следующего соотношения [7]:

$$2l_{*,\max}^{\text{обр макро}} = \frac{h_* \cdot E}{4(1-\nu^2)\gamma_1 \cdot \sigma_c}, \quad (29)$$

где  $h_* \approx d_{\max}$  – размер блока в лабораторном образце,  $E$  – модуль упругости пород;  $\gamma_1$  – эмпирический коэффициент;  $\sigma_c$  – предел прочности на одноосное сжатие;  $\nu$  – коэффициент Пуассона пород.

Проведенные оценочные расчеты показывают, что величина такого макродефекта для образцов примерно соответствует их размерам [12]. При переходе к следующему верхнему структурному уровню в иерархии породных блоков образец горной породы выступает в качестве такого блока с размерами 10–100 см, что соответствует параметрам большинства трещинных систем массива. При этом соотношение 1:100 дает размеры массива, в пределах которых сохраняются геометрические требования масштабирования, как 10–100 м (в среднем 1:50). При сохранении механизмов разрушения (отрыв при сжатии) для выработок диаметром до 4–5 м требования геометрического подобия, по-видимому, нарушены не будут, что соответствует размерам большинства одиночных горных выработок угольной и рудной промышленности.

Переходя далее к размерам дефектов на иерархическом уровне породных блоков, соответствующем размерам горных выработок, можно заметить, что мезодефектом в этом случае будет макродефект нижнего иерархического уровня (3.1).

Сохранение механизмов сдвиго-отрывного разрушения на уровне образца горной породы и массива вокруг подземных выработок отмечалось в ряде работ [6, 7, 11, 23, 24, ч. 1–4; 25]. Поэтому расчет коэффициентов интенсивности напряжений в соответствии с методикой [12] для образца и массива на мезоуровне будет отличаться размерами дефектов и величиной учитываемых при этом напряжений. По-видимому, характеристики мезоуровня образца сохраняет дефект, для которого хорошо фиксируется напряжение в эксперименте между  $P^*$  и  $\sigma_c$  (рис. 22). Тогда коэффициент интенсивности напряжений без больших погрешностей можно принять как:

$$K_I = \sqrt{\pi l_{mezo}^{обp}} \gamma_1 \cdot \sigma_c, \quad (30)$$

где  $l = (5–10) d$ , а остальные характеристики соответствуют (29).

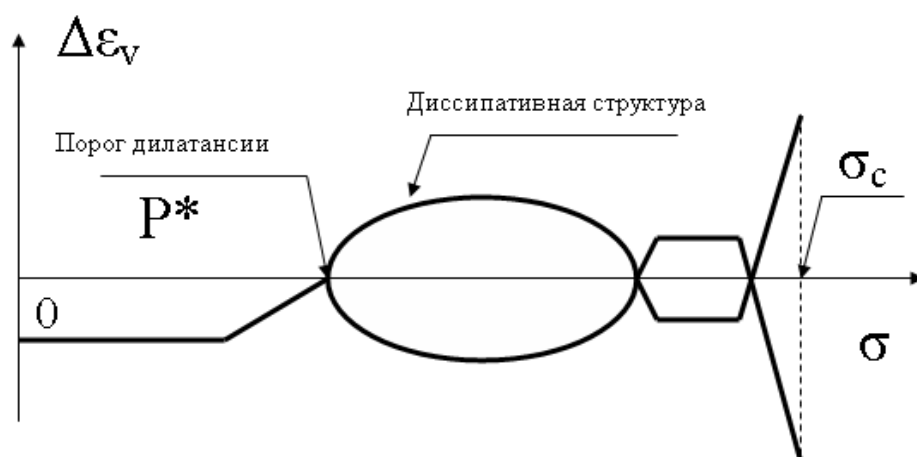


Рис. 22. Закономерности и этапы деформирования образцов горных пород в предразрушающей области нагружения

Для массива, где минимальный размер мезодефекта соответствует критической длине макротрещины образца, напряжение должно соответствовать уровню остаточных напряжений, а коэффициент интенсивности рассчитывается по формуле:

$$K_I = \sqrt{\pi l_{mezo}^{mac} \gamma_1} \cdot \sigma_{ост} , \quad (31)$$

где  $l = (5-10) h^*$ .

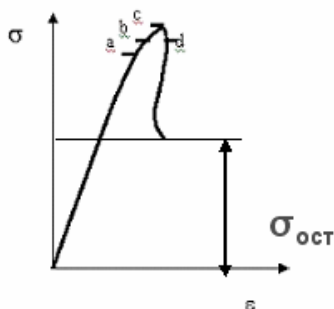


Рис. 22. Схема определения характеристик, входящих в критерий разрушения

При указанных соотношениях и с учетом отличия характеристик массива и образца  $E$  и  $\gamma_1$  легко показать, что коэффициенты интенсивности массива и образца на мезоуровне отличаются незначительно. Поэтому в первом приближении их можно принять равными.



Соотношения размеров породных блоков различных иерархических уровней и дефектов различных масштабных уровней для образцов горных пород и массивов приведено в таблице 3.

Таблица 3

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

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

Подставляя в полученное равенство соответствующие значения КИН для образца и массива, полученные ранее, не сложно определить величину амплитудного параметра математической модели зонального разрушения горных пород вокруг подземных выработок. Появляется также возможность провести сопоставительные расчеты с данными экспериментов по определению характеристик зональной структуры разрушения вокруг выработок, полученные другими авторами (рис. 23). Как видно из рисунка, расчетные значения отличаются от экспериментальных не более чем на 20%.

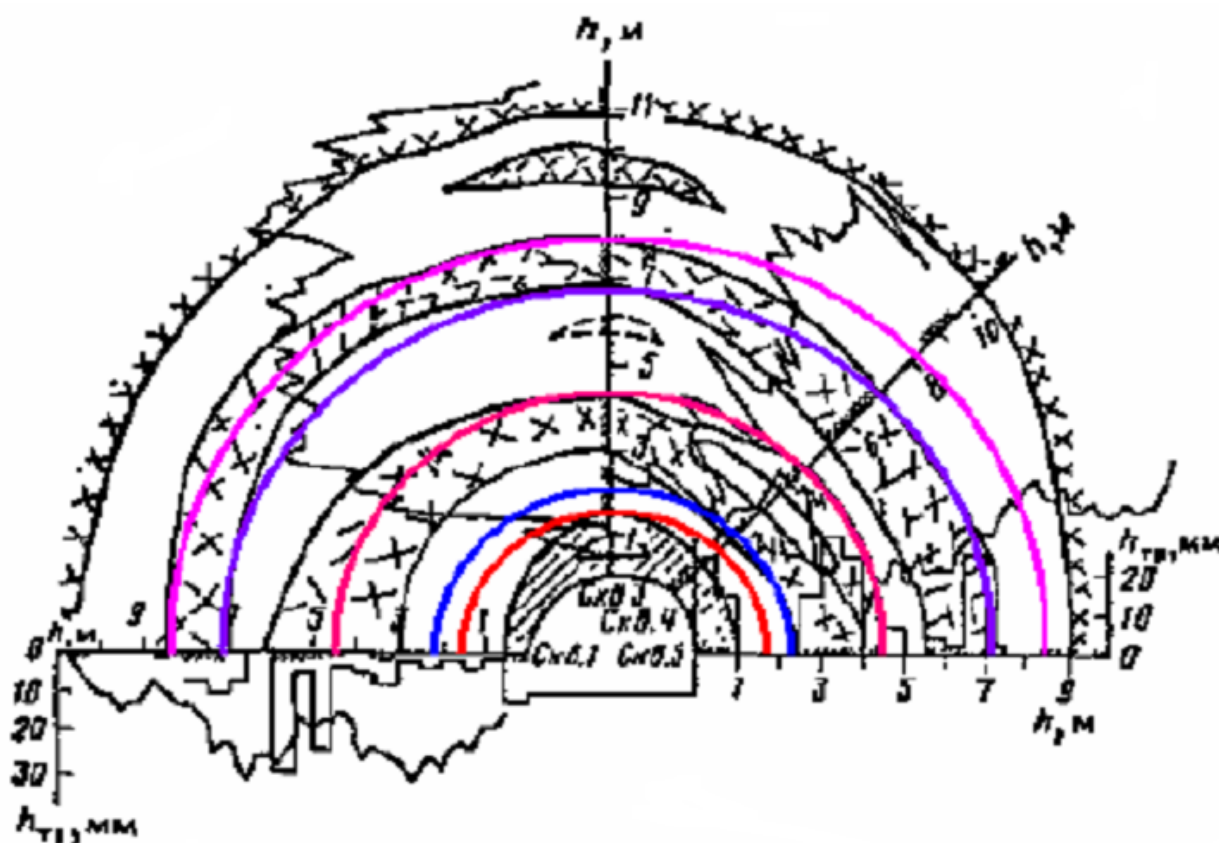


Рис. 23. Результаты сравнения экспериментальных [20] и теоретических исследований зональной структуры разрушения массива вокруг выработок

Таким образом, нахождение параметров математической модели зонального разрушения массива вокруг подземных выработок по данным натуральных и лабораторных экспериментов показывает свою достаточную эффективность.

\*\*\*

Подводя итог вышеизложенному, можно констатировать, что сильное сжатие горной породы – это состояние, при котором в ней возникают и развиваются дефектно-деформационные диссипативные мезотрещинные структуры (ДМС).

Сформулированная Концепция сильно сжатой блочной иерархично структурированной геосреды дает характеристику возникновению и развитию ДМС периодического типа, описываемых математическими моделями механи-

ки дефектных сред с определенными правилами перехода между иерархическими уровнями образца и массива.

На современном этапе развития Концепция позволяет прогнозировать параметры зональной структуры разрушения массива вокруг подземных выработок по данным натурных исследований и лабораторных экспериментов с образцами горных пород, что значительно опережает мировой уровень в этой области исследований. Кроме того, эта Концепция лежит в основе разработки системы предвестников разрушения образцов горных пород, включающих надежно устанавливаемые долгосрочный, среднесрочный и краткосрочный предвестники, что также является новым в области прогноза геодинамических явлений.

**Исследование выполнено по тематике Федеральной целевой программы «Научные инновационные кадры России», Госконтракты № 02.740.11.0315 и П1402.**

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев А.Д., Морозов А.Ф., Метлов К.Л., Метлов Л.С. Исследование явления зональной дезинтеграции вокруг горных выработок в изолиниях // X Междунар. конф. по механике горных пород: тез. докл. М., 1993. С. 22.
2. Глушихин Ф.П., Кузнецов Г.Н., Шклярский М.Ф. и др. Моделирование в геомеханике. М.: Недра, 1991. 240 с.
3. Глушихин Ф.П., Шклярский М.Ф., Рева В.Н. и др. Новые закономерности разрушения горных пород вокруг выработок // Шахтное строительство. 1986. № 2. С. 11-14.
4. Гузев М.А., Макаров В.В. Деформирование и разрушение сильно сжатых горных пород вокруг подземных выработок. Владивосток: Дальнаука, 2007. 232 с.
5. Карташов Ю.М., Матвеев Б.В., Михеев Г.В. и др. Прочность и деформируемость горных пород. М.: Недра, 1979. 240 с.
6. Кириченко В.Я., Шмиголь А.В., Рева В.Н. О механизме пучения почвы выработок, сооружаемых в слабых породах // Шахтное строительство. 1988. № 11. С. 3-5.
7. Кузнецов Ю.С. Исследование влияния горно-геологических факторов на проведение и поддержание капитальных выработок глубоких горизонтов Октябрьского и Талнахского месторождений: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1983. 18 с.
8. Кузнецов Ю.С. Устойчивость горных выработок на удароопасных участках рудников «Октябрьский» и «Таймырский» Норильского ГМК // Устойчивость и крепление горных выработок. Л.: ЛГИ. 1981. Вып. 7. С. 62-69.

9. Макаров. П.В. Об иерархической природе деформации и разрушения твердых тел и сред // Физ. мезомех. 2004. Т. 7, № 4. С. 25-34.
10. Морозов А.Ф. Повышение устойчивости интенсивно деформирующихся подготовительных выработок глубоких шахт: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук. М., 1992. 30 с.
11. Морозов А.Ф., Юскевич А.М. Флуктуации зональной дезинтеграции осадочных пород вокруг подготовительной выработки // Уголь Украины. 1991. № 7. С. 36-39.
12. Одинцев В.Н. Отрывное разрушение массива скальных горных пород. М.: ИПКОН РАН, 1996. 166 с.
13. Опарин В.Н., Танайно А.С. Представление размеров естественных отдельных частей горных пород в канонической шкале. Классификация // ФТПРПИ. 2009. № 6. С. 40-53.
14. Садовский М.А. Естественная кусковатость горной породы // ДАН СССР. 1979. Т. 247, вып. 4. С. 829-831.
15. Соболев Г.А., Кольцов А.В. Крупномасштабное моделирование подготовки и предвестников землетрясений / под ред. А.А. Садовского. М.: Наука, 1988. 208 с.
16. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
17. Ставрогин А.Н. Исследование предельных состояний и деформации горных пород // Физика Земли. 1969. № 12. С. 3-17
18. Стаховский И.Р. Деформационные предвестники разрушения крупномасштабных образцов горных пород // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1983. № 10. С. 90-94.
19. Стаховский И.Р. Трещинообразование и поверхностные деформации в зоне деформирующегося сдвигового разрыва в образце горной породы // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1988. № 5. С. 88-94.
20. Тажибаев К.Т. Деформация и разрушение горных пород. Фрунзе: Илим, 1986. 108 с.
21. Томашевская И.С., Хамидуллин Я.Н. Предвестники разрушения образцов горных пород // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1972. № 5. С. 12-20.
22. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов: В 2-х т. / под ред. В.Е. Панина. Новосибирск: Наука, 1995. Т. 1. 297 с.; т. 2. 320 с.
23. Шемякин Е.И., Курленя М.В., Опарин В.Н., Рева В.Н., Глушихин Ф.П., Розенбаум М.А. Явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок // Открытие. № 400. 1992. № 1. С. 3.
24. 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; ч. 2. Разрушение горных пород на моделях из эквивалентных материалов // ФТПРПИ. 1986. № 4. С. 3-12; ч. 3. Теоретические

- представления // ФТПРПИ. 1987. № 1. С. 3-8; ч. 4. Практические приложения // ФТПРПИ. 1989. №. С. 3-9.
25. Шемякин Е.И., Фисенко Г.Л., Курленя М.В., Опарин В.Н. и др. Эффект зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок // ДАН СССР. 1986. Т. 289, № 5. С. 1088-1094.
26. Шмиголь А.В., Кириченко В.Я., С.К. Бучатский, В.Н. Рева. Шахтные исследования характера разрушения слабых пород на шахтах Западного Донбасса. // Шахтное строительство. 1987. № 5. С. 11-12.
27. Указания по безопасному ведению горных работ на Южном месторождении (участок «Перспективный»), склонном к горным ударам. Свердловск, 1990. 54 с.
28. Adams G.R., Jager A.J. Petroscopic observation of rock fracturing ahead of stop faces in deep-level gold mines // J. South African Inst. Mining and Metallurgy. 1980. V. 80, N 6. P. 204-209.
29. Brace W.F., Paulding B.W., Scholz C. Dilatancy in fracture of crystalline rocks // J. Geophys. Research. 1966. V. 16, N 71. P. 3930-3953.
30. Bridgman P. Volume changes in the plastic stages of simple compression // J. Appl. Phys. 1949. N 20. P. 1241-1251.
31. Kotte A.O. Stress-strain relations and breakage of cylindrical granite rock specimens under uniaxial and triaxial loads // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 1969. V. 6, N 6. P. 581-595.
32. Lockner D.A., Byerlee J.D., Kuksenko V., Ponomarev A. Sidorin A. Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite // Nature. 1991. V. 350, N 7. P. 39-42.
33. Mead W. J. The geologic role of dilatancy // J. Geol. 1925. N 33. P. 685-698.
34. Osamu Idehara, Tokashi Satoh, Osamu Nishizawa, Kinichiro Kusunose. Hypocenters distribution and focal mechanisms of AE events under triaxial compression. Experimental apparatus and hypocenter distribution // J. Seismology. Soc. Japan. 1986. V. 39, N 2. P. 289-300.
35. Reynolds O. On the dilatancy of media composed of rigid particles in contact // Philos. Mag. 1885. Ser. 5. V. 20, N 127. P. 469-481.
36. Takahashi M., Lin W., Li X., Kwasniewski M. Mechanical and Hydraulic Behaviors in Shirama Sandstone under True Triaxial Compression Stress // Proc. Int. Symp. ISRM, EUROCK, 2005. Brno. May 18-20, 2005. Brno: UCN, 2005. P. 236-248.