

УДК 539.3

А.М. Голосов

ГОЛОСОВ АНДРЕЙ МИХАЙЛОВИЧ – инженер кафедры горного дела и комплексного освоения георесурсов Инженерной школы (Дальневосточный федеральный университет, Владивосток). Суханова ул., 8, Владивосток, 690950. E-mail: a-dune@mail.ru

## **Об эффекте реверсивного деформирования образцов горных пород при одноосном сжатии**

Явление реверсивного деформирования образцов горных пород при сжатии обсуждается начиная с 1958 г., однако его механизм до настоящего времени не был установлен. Ранее выдвигавшиеся гипотезы, среди которых гипотеза бочкообразного деформирования, гипотеза упругого восстановления, остаточных напряжений и другие, не объясняют всех установленных экспериментально фактов. Проведенные автором с применением современного нагрузочного, акустического и деформационного оборудования специальные комплексные исследования показали непосредственную связь реверсивных аномалий с формированием очаговой области подготовки макроразрушения. Выдвинутая автором гипотеза околоочагового механизма явления реверсивного деформирования подтверждена нами в процессе специального эксперимента.

*Ключевые слова:* образцы, горные породы, реверсивные деформации, акустическая эмиссия, очаговая область.

Реверсивный характер линейных деформаций образцов горных пород был установлен, по видимому впервые, в работе [7]. Здесь авторы не исследовали механизмы возникновения деформационных аномалий, но уже в последующих работах других авторов такие попытки предпринимались. Так, в [4] реверсивный характер деформаций горных пород связывался с дилатансионными эффектами при деформировании образцов в условиях одноосного сжатия, а в [3] в качестве причины деформационных аномалий различного толка выдвигались остаточные напряжения. Однако эти гипотезы не выдерживают критики при ближайшем рассмотрении [2].

В настоящей статье автор на основе специально разработанного им метода комплексного исследования, включающего деформационную и акустическую методики, анализирует деформационные аномалии реверсивного типа в образцах горных пород при одноосном сжатии, определяет место их возникновения по отношению к очаговой области подготовки макроразрушения.

### **Экспериментальные исследования особенностей деформирования образцов горных пород в предразрушающем состоянии**

В основу проведенных исследований была положена двухстадийная модель формирования макротрещин, ее суть: после периода рассеянного микроастрескивания наступает стадия локализованного формирования очаговой области подготовки макроразрушения, за которой следует стадия формирования и развития макродефекта [6]. Современные методы исследований с применением сервоуправляемых жестких нагрузочных устройств позволяют проводить измерения непосред-

ственно перед разрушением, а многоканальные измерительные приборы – исследовать поведение образца в целом, в том числе вокруг очага разрушения.

Разработанная автором методика деформационных многоточечных исследований образцов сильно сжатых горных пород предусматривает одноосное нагружение сервоуправляемым жестким нагрузочным устройством MTS-816 и тензорезисторный способ локального измерения деформаций как в центральной части образца, так и по его высоте. При этом «крестовая» конструкция самого тензорезистора позволяет производить измерения как продольных, так и поперечных деформаций в одной позиции, что устраняет возможность объединения в единичном измерении разнокачественных процессов. Условия нагружения, торцовые условия и размеры образца при сжатии принимаются с учетом влияния контактов торцов с прессом [5].

Исследования проводились на образцах различных скальных пород, включая дациты, риолиты, гранодиориты, граниты-порфириды и другие. Тензорезисторы наклеивались через равные интервалы по всему периметру образца, от четырех до восьми пар в одном ряду и от одного (в середине) до трех рядов по высоте. Для обеспечения сохранности проволочных выводов была разработана специальная схема их крепления на образце. Показания тензорезисторов фиксировались при помощи компьютерной программы многоканального устройства УИУ-2000. Исследования проведены в лаборатории геодинамики Инженерной школы ДВФУ.

На рис. 1 показана схема наклейки датчиков во время испытаний. Всего было испытано 4 серии по 10 образцов в каждой для различных типов пород. Исследования проводились при одноосном сжатии образцов по многоточечной схеме измерений от 8 до 48 датчиков.

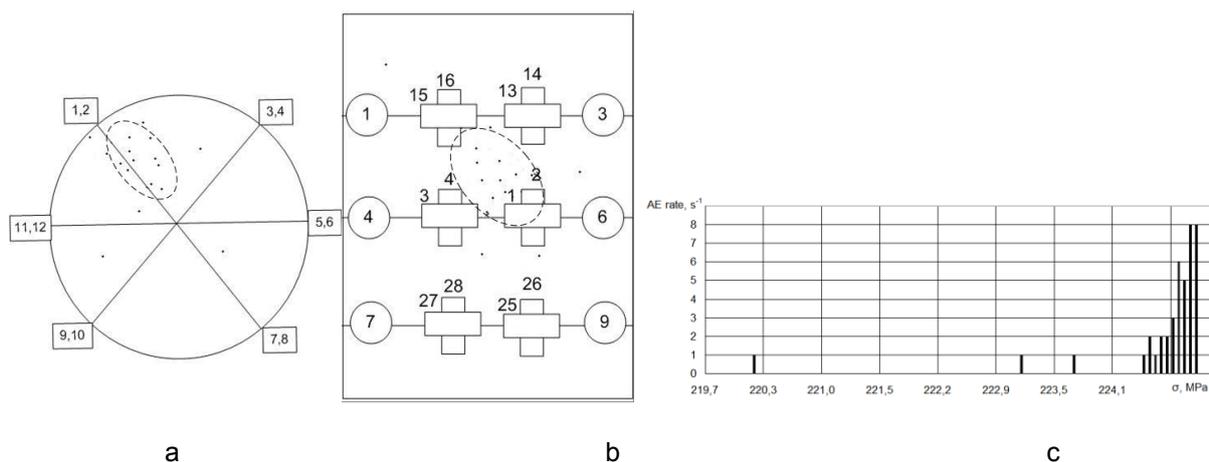


Рис. 1. а – схема измерений, б – положение очага разрушения образца риолита, в – изменение интенсивности АЭ.

Положение очага фиксировалось по данным акустических исследований с применением комплекса «Интерюнис». Изменение интенсивности АЭ во время нагружения показано на рис. 1, в. Как показывает рис. 1, в, активное трещинообразование начинается с уровня нагружения в 224 МПа, что соответствует моменту отклонения кривых напряжение–деформация от линейной зависимости. Положение очага разрушения относительно пар тензорезисторов показано на рис. 1, а, б.

Основные результаты исследований закономерностей деформирования образцов горных пород в предразрушающем состоянии с использованием новейшего оборудования сводятся к следующему. В предразрушающей стадии нагружения наблюдается ряд аномальных деформационных эффектов, которые можно было бы использовать в качестве предвестников. Во-первых, это выполаживание деформационных кривых с уменьшением на этом участке модулей деформаций в 1,5–3 и более раз, а также изменение знака приращения линейных деформаций в отдельных точках (рис. 2, а). Положительные деформационные аномалии особенно ярко проявляются в области очага, что демонстрирует рис. 2, б. В этой части имеют место два аномальных деформационных эффекта, где кроме уже отмеченного эффекта значительного (в несколько раз) уменьшения модуля

деформации закономерно фиксируется резкое увеличения приращений поперечных деформаций, которое сопоставимо по величине или даже превышает приращение продольных деформаций. Таким образом, результаты экспериментов показывают, что в образце появляются области с различными деформационными характеристиками. При этом очаговая область характеризуется U-образной формой кривой объемных деформаций.

Одновременно в направлении оси нагружения в окрестности очаговой области происходит реверсивное изменение линейных деформаций, где с ростом напряжений меняется знак их приращения (рис. 3). Меняется знак приращения как продольных, так и поперечных деформаций, при этом отрицательные приращения продольных деформаций превышают отрицательные приращения поперечных деформаций (рис. 3,б). Такой характер деформирования может быть characterized как **реверсивное деформирование первого типа**.

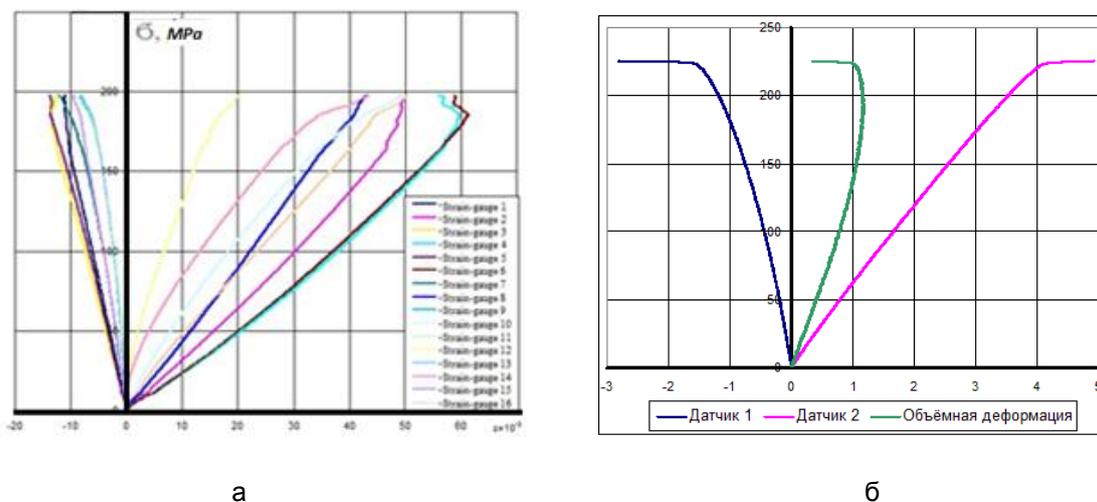


Рис. 2. Закономерности деформирования образцов горных пород: а – дацита в предразрушающей стадии нагружения: линейные деформации, центральная часть; б – характер линейных деформаций в очаговой части образца риолита.

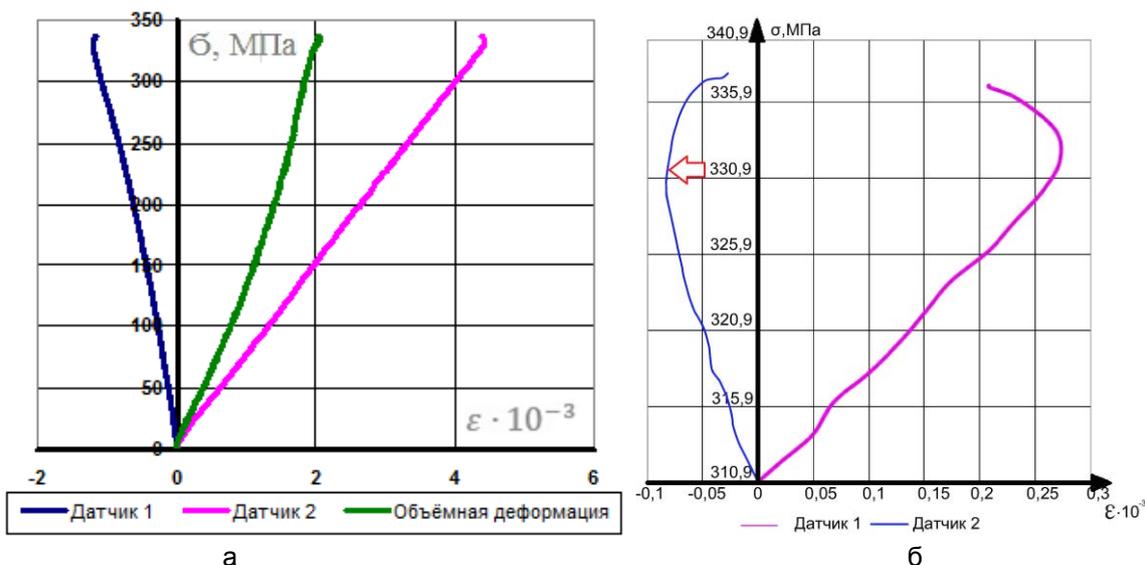


Рис. 3. Область реверсивных деформаций первого типа: а – линейные и объемные деформации, б – линейные деформации в конечной стадии нагружения.

Одновременно рядом с очаговой областью перпендикулярно оси нагружения образуется зона деформирования, также характеризующаяся отрицательными приращениями продольных и поперечных деформаций, где приращение поперечных деформаций, напротив, превышает величину приращения продольных деформаций (рис. 4,б). Такой характер деформирования может быть обозначен как **реверсивное деформирование второго типа**.

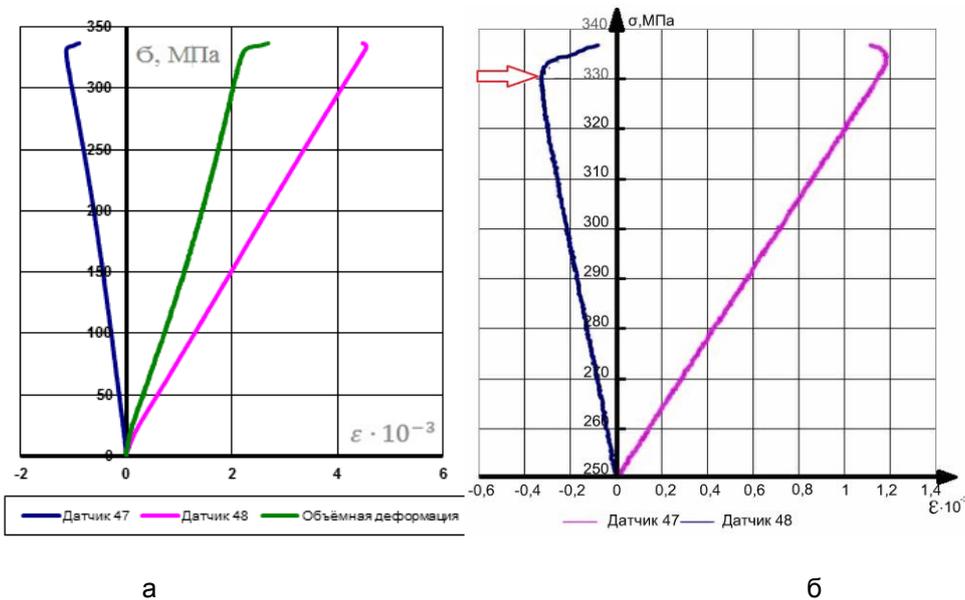


Рис. 4. Область реверсивных деформаций второго типа: а – линейные и объемные деформации, б – линейные деформации в конечной стадии нагружения.

Анализ показывает, что имеет место непосредственное влияние очаговой области на аномальное поведение горной породы в прилегающих участках образца: увеличение объема в очаговой области приводит к сжатию в соседних областях, перпендикулярных оси нагружения. Расположение зон реверсивного деформирования первого и второго типов относительно очаговой области показано на рис. 5.

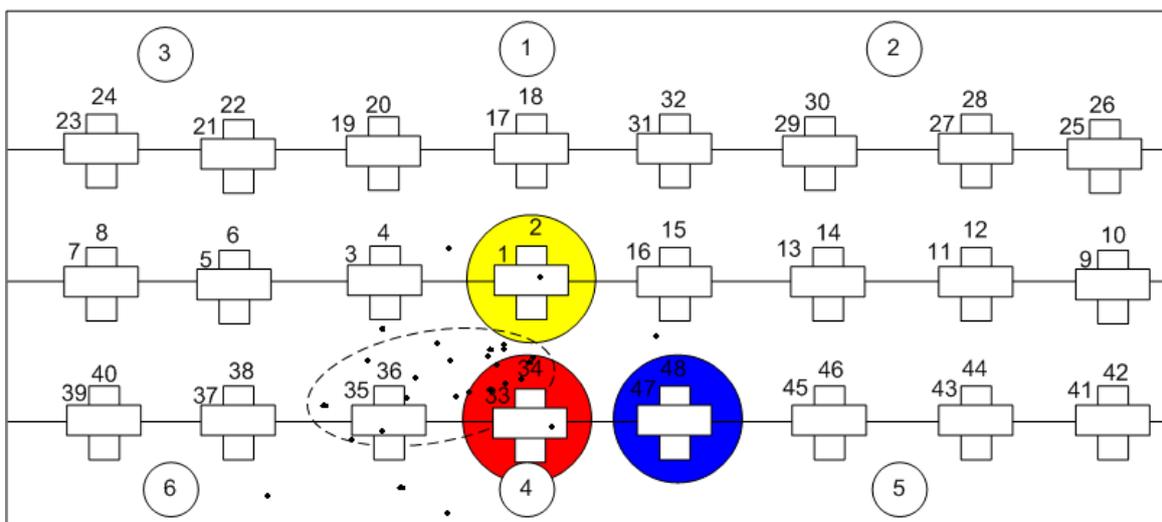


Рис. 5. Расположения зон реверсивного деформирования первого и второго типов относительно очаговой области: ● – очаговая область; ● – зона реверсивного деформирования первого типа; ● – зона реверсивного деформирования второго типа.

Контрольные деформационные исследования по аналогичной методике были проведены также в лаборатории механики разрушения горных пород Западно-Австралийского Университета, г. Перт, Австралия. Результаты исследований полностью аналогичны вышеописанным. Для сравнения некоторые данные сведены в таблицу. Установленные виды аномального деформирования образцов горных пород в предразрушающей области нагружения при одноосном сжатии показаны на рис. 6. Первый вид аномалий, связанный с экстремальными значениями линейных деформаций, известен в литературе как присущий очаговой области подготовки макроразрушения [5].

### Механизм явления реверсивного деформирования

Механизм реверсивных деформаций до настоящего времени не имел однозначной интерпретации. Поэтому нами была разработана гипотеза околоочагового реверсивного деформирования образцов горных пород при одноосном сжатии, заключающаяся в том, что в результате формирования очаговой области подготовки макроразрушения образца его деформации приобретают неоднородный характер, причем в самой очаговой области линейные деформации достигают экстремально больших значений обычного знака, а в прилегающей околоочаговой части реализуются реверсивные деформации.

### Соотношения приращений поперечных и продольных деформаций в зонах деформационных аномалий

№ образца	Тип аномалии	Приращение поперечных деформаций, $\Delta \varepsilon_{\perp} * 10^{-3}$	Приращение продольных деформаций, $\Delta \varepsilon_{\parallel} * 10^{-3}$	Отношение поперечных к продольным $\Delta \varepsilon_{\perp} / \Delta \varepsilon_{\parallel}$
Образец 20	1-й	-0,007533	-0,04152	0,18143
	2-й	-0,037554	-0,015011	2,501822
Образец 23	1-й	-0,049164	-0,07189	0,68386
	2-й	-0,248773	-0,03669	6,78086

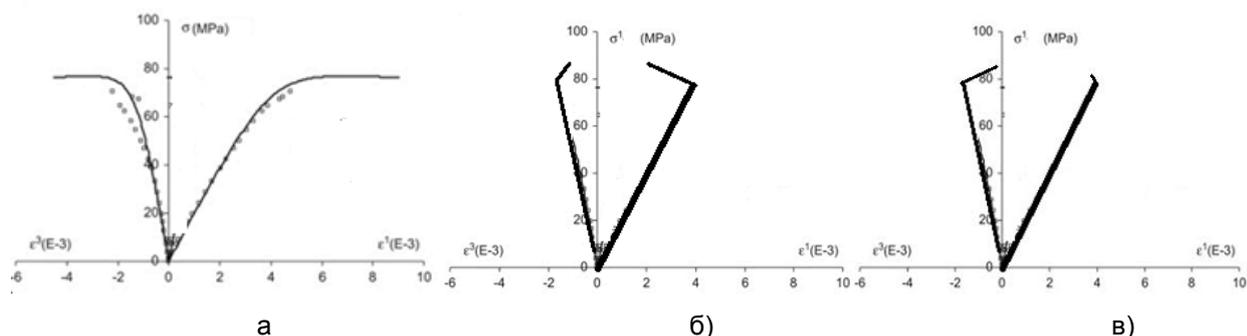


Рис. 6. Виды деформационных аномалий: а – очаговой области, б, в – околоочаговой области первого и второго типа соответственно.

Разработанная гипотеза основывается на представлении очаговой области подготовки макроразрушения неоднородностью типа «квазимиагкого включения», деформационные характеристики которой (модуль деформации и коэффициент Пуассона) существенно отличаются от аналогичных характеристик окружающего материала, что обусловлено взаимодействием локализуемых в очаговой области мезодефектов в процессе их накопления с ростом нагрузки.

Исследование эффекта реверсивных линейных деформаций образцов горных пород, рассмотренное в настоящей статье, показывает закономерный характер установленных деформаци-

онных аномалий, которые относятся к околоочаговой области блочного материала в предразрушающем состоянии. Рассмотрение механизма реверсивного деформирования требует специального анализа с привлечением комплекса методов создания искусственных ослаблений образцов, моделирующих очаговую область, а также экспериментального и теоретического воспроизведения двух типов деформационных аномалий.

Практическое значение явления реверсивного деформирования сильно сжатых образцов горных пород очень обширно и заключается в доказательстве образования мезоструктур «контрастного» типа в блочных средах, упоминаемых в работе [1]. Это, в свою очередь, указывает на возможность появления областей с различными свойствами в сильно сжатом состоянии материала, что может найти применение в прогнозе макроразрушения. Эти вопросы также требуют отдельного рассмотрения.

Публикация была выполнена при поддержке гранта Научного фонда Дальневосточного федерального университета № 13-06-0113м\_а и гранта Министерства науки и образования РФ № 5.2535.2014К.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольдин С.В. Макро- и мезоструктуры очаговой области землетрясения // Физическая мезомеханика. 2005. Т. 8, № 1. С. 3–14.
2. Гузев М.А., Макаров В.В. Деформирование и разрушение сильно сжатых горных пород вокруг выработок / Ин-т автоматизации и процессов управления ДВО РАН. Владивосток: Дальнаука, 2007. 231 с.: ил.
3. Тажибаев К.Т. Деформация и разрушение горных пород. Фрунзе: Илим, 1986. 108 с.
4. Томашевская И.С., Хамидуллин Я.Н. Предвестники разрушения образцов горных пород // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1972. № 5. С. 12–20.
5. Guzev M.A., Makarov V.V., Ushakov A.A. Modeling elastic behavior of compressed rock samples in the pre-failure zone. *Journal of Mining Science*. New York, Springer. 2005(41);6:497-590.
6. 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.
7. Seldenrath Th.R., Gramberg J. Stress-strain relations and breakage of rocks. *Mechanical Properties of Non-Metallic Materials*. London: Butterworths, 1958. P. 79-102.

THIS ARTICLE IN ENGLISH SEE NEXT PAGE

Golosoov A.

ANDREI M. GOLOSOV, Engineer, Department of Mining Engineering, School of Engineering, Far Eastern Federal University, Vladivostok. 8 Sukhanova St., Vladivostok, Russia, 690950, e-mail: a-dune@mail.ru

## Mechanism of Rock Samples Reversible Deformation under Uniaxial Stress

The phenomenon of rock samples reversible deformation under stress discussed since 1958, but the mechanism of this phenomenon has not yet been find out. Previously suppositions are not explains all the experimentally established facts. Conducted using modern load frame, strain and acoustic equipment, special complex studies have shown a direct relationship with the formation of reversible deformations with forming source of failure. The hypothesis of near-source mechanism of reversible deformations has been confirmed during special tests.

*Key words:* samples, rocks, reversible deformation, acoustic emission, source of failure.

### REFERENCES

1. Goldin S.V. Macro- and mesostructures of the fault zone earthquake. Physical Mesomechanics. 2005(8);1:3-14. (in Russ.). [Gol'din S.V. Makro- i mezostrukturny ozhagovoj oblasti zemletrjasenija // Fizicheskaja mezomehanika. 2005. T. 8, № 1. S. 3-14].
2. Guzev M.A., Makarov V.V. Deformation and fracture of the high stressed rocks around openings. Vladivostok, 2007, 231 p. (in Russ.). [Guzev M.A., Makarov V.V. Deformirovanie i razrushenie sil'no szhatyh gornyh porod vokrug vyrabotok / RAN, Dal'nevost. otd-nie, In-t avtomatiki i processov upr. Vladivostok: Dal'nauka, 2007. 231 s.: il.].
3. Tazhibayev K.T. The deformation and fracture rocks. Frunze, Ilim, 1986, 108 p. (in Russ.). [Tazhibayev K.T. Deformacija i razrushenie gornyh porod. Frunze: Ilim, 1986. 108 s.].
4. Tomashevskaya I.S., Khamidullin Y.N. Precursors of rock samples fracture. Math. USSR Academy of Sciences. Fiz. 1972;5:12-20. (in Russ.). [Tomashevskaja I.S., Hamidullin Ja.N. Predvestniki razrushenija obrazcov gornyh porod // Izv. AN SSSR. Fizika Zemli. 1972. № 5. S. 12-20].
5. Guzev M.A., Makarov V.V., Ushakov A.A. Modeling elastic behavior of compressed rock samples in the pre-failure zone. Journal of Mining Science. New York, Springer. 2005(41);6:497-590.
6. 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.
7. Seldenrath Th.R., Gramberg J. Stress-strain relations and breakage of rocks. Mechanical Properties of Non-Metallic Materials. London: Butterworths, 1958. P. 79-102.