

*правах рукописи*



**Голосов Андрей Михайлович**

**РАЗРАБОТКА АКУСТИКО-ДЕФОРМАЦИОННОГО МЕТОДА  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДВЕСТНИКОВ РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ  
ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ**

Специальность – 25.00.20 Геомеханика, разрушение пород,  
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

**диссертации**

**на соискание ученой степени кандидата технических наук**

Владивосток 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Дальневосточный федеральный университет» (ДВФУ)

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Макаров Владимир Владимирович**

**Официальные оппоненты:** **Одинцев Владимир Николаевич**, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр РАН, ведущий научный сотрудник отдела проблем управления освоением и сохранением недр Земли;  
**Дамаскинская Екатерина Евгеньевна**, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, старший научный сотрудник лаборатории физики прочности.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет"

Защита диссертации состоится 7 июня 2018 года в 15<sup>00</sup> на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.101.03, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тихоокеанский государственный университет», Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Дальневосточный федеральный университет», по адресу: 68000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, д. 51, конференц-зал.  
Тел./факс: 8(4212)32-79-27, e-mail: adm@igd.khv.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБУН Института горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук по адресу: 680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, д. 51 и на сайте института [www.igd.khv.ru](http://www.igd.khv.ru)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук



Корнеева Светлана Ивановна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Предотвращение катастрофических последствий геодинамических явлений типа горных ударов или землетрясений требует развития прогностической базы этих событий, что связано с развитием представлений о механизмах формирования очагов макроразрушения и связанных с этим предвестников. Прогнозирование образования в горных породах очагов таких явлений возможно с помощью системы предвестников, основывающихся на физических представлениях о механизмах формирования и развития макроразрушения. В настоящее время основным предвестником разрушения принято считать явление дилатансии, заключающееся в увеличении объема горной породы при сжатии. Дилатансию можно рассматривать как долгосрочный предвестник. Для повышения качества прогноза необходимо установление надежного среднесрочного предвестника.

Выявление среднесрочных предвестников геодинамических явлений требует проведения детальных исследований закономерностей не только деформирования горных пород в состоянии предразрушения, но и привязки наблюдающихся в этой области деформационных аномалий к положению очаговой области подготовки геодинамического явления. Такие исследования возможно осуществить на образцах горных пород в лабораторных условиях, рассматривая образцы в качестве нижнего иерархического уровня геосреды, что позволяет в дальнейшем осуществлять перенос результатов прогнозирования разрушения на массив.

Ярким проявлением деформационных аномалий в предразрушающем состоянии образцов горных пород является реверсивный характер линейных деформаций. Несмотря на имевшие место попытки определить механизм этого явления, однозначного толкования причин реверса линейных деформаций установлено не было. Формулировка околоочаговой гипотезы указанного явления требует комплексных акустических и деформационных исследований определения положения и размера очаговой области подготовки макроразрушения, а также многоточечных деформационных исследований, где положение измерительных приборов соотносится с положением этой области.

Установление механизмов явлений аномального состояния материала горной породы предполагает ограничение исследований простыми случаями нагружения, какими являются условия одноосного сжатия. Таким образом, разработка акустико-деформационного метода надежного определения системы предвестников разрушения образцов горных пород при одноосном сжатии является актуальной задачей.

Работа выполнялась при поддержке грантов Министерства образования и науки (ГК №14.740.11.1214, №5.2535.2014/К, №14.А18.21.1980, №02.740.11.0315; по программе Федерального агентства по образованию РФ (ГК №П1402, №П1267), Научного Фонда ДВФУ (№13-06-113-м\_а);

Федеральной целевой программы (Соглашение №14.575.21.0009 – УИН ПНИ RFMEFI57514X0009), гранта РФФИ (16-35-00-122\16).

**Целью работы** является разработка акустико-деформационного метода определения системы деформационных предвестников разрушения образцов горных пород при одноосном сжатии, учитывающего положение очаговой области подготовки макроразрушения и включающего долгосрочный и среднесрочный предвестники.

**Основная идея работы** заключается в повышении достоверности определения предвестников макроразрушения образцов горных пород на основе установления закономерностей их проявления в очаговой и околоочаговой областях подготовки макроразрушения, определяемых одновременно двумя независимыми деформационным и акустическим методами.

**Задачи исследований** заключаются в исследовании закономерностей деформирования образцов горных пород в предразрушающей области нагружения; в установлении механизма реверсивного деформирования образцов горных пород в предразрушающей области нагружения; в разработке новых и совершенствовании существующих методов определения предвестников разрушения образцов горных пород.

**Методы и средства исследования** включают экспериментальные методы исследования напряженно-деформированного состояния образцов при сжатии, акустико-эмиссионные методы определения положения очаговой области разрушения, аналитические методы механики дефектных сред, методы программирования в прикладных пакетах ANSYS, MAPLE, аналитические и графоаналитические методы обработки полученных результатов.

#### **Научные положения, защищаемые в диссертации:**

1. Формирование мезотрещинной структуры образцов горной породы при одноосном сжатии проходит несколько стадий, включающих начальную стадию, когда в образце возникают одиночные невзаимодействующие друг с другом мезодефекты; очаговую стадию подготовки макроразрушения, когда в результате взаимодействия мезодефектов происходит их локализация в определённой, ограниченной в пространстве, области, а при продолжающемся нагружении образца в очаговой области и ее окрестностях происходит разнознаковое приращение линейных деформаций, причем завершение стадии связано с развитием устойчивого макродефекта.

2. Фиксируемыми одновременно независимыми деформационной и акустической измерительными системами предвестниками разрушения горных пород в образцах являются: **долгосрочный предвестник**, соответствующий порогу дилатансии и началу возникновения высокоамплитудных акустических сигналов, обусловленных возникновением одиночных невзаимодействующих мезодефектов; **среднесрочный предвестник**, соответствующий возникновению мезотрещинной структуры, связанной с очаговой стадией локализации мезодефектов и разнознаковым

приращением линейных деформаций в очаговой и околоочаговой областях подготовки макроразрушения.

3. Акустико-деформационный метод определения системы предвестников разрушения образцов горных пород при одноосном сжатии заключается в том, что при синхронной работе акустической и деформационной измерительных систем регистрируются основные этапы формирования мезотрещинных структур образцов горных пород, причем порог дилатансии и начало возникновения высокоамплитудных акустических сигналов, обусловленных возникновением одиночных невзаимодействующих мезодефектов, принимается в качестве **долгосрочного предвестника**; а момент возникновения мезотрещинной структуры, связанной с очаговой стадией локализации мезодефектов, и характеризуемый разнознаковым приращением линейных деформаций в очаговой и околоочаговой областях, принимается в качестве **среднесрочного предвестника**.

**Научная новизна работы** заключается в том, что:

1. Определена связь основных этапов деформирования образцов горных пород с развитием мезотрещинного процесса, заключающаяся в том, что порогу дилатансии соответствует начало возникновения высокоамплитудных акустических сигналов, обусловленных одиночными невзаимодействующими мезодефектами, а разнознаковому приращению линейных деформаций в очаговой и околоочаговой областях соответствует очаговая стадия локализации мезодефектов.

2. Установлен эффект формирования в образцах горных пород в предразрушающей области нагружения мезотрещинных структур, обусловленных прохождением очаговой стадии подготовки макроразрушения, заключающийся в том, что при локализации мезотрещинного процесса в очаговой области подготовки макроразрушения скорость акустической эмиссии достигает максимума, при этом линейные деформации в очаговой области приобретают экстремальные значения, а в околоочаговой области линейные деформации приобретают реверсивный характер.

3. Установлен механизм реверсивных линейных деформаций в околоочаговой области формирования макродефекта при одноосном сжатии образцов горных пород, заключающийся в том, что, начиная с момента формирования очаговой области подготовки макроразрушения, обусловленного началом взаимодействия мезодефектов, в ее окрестности, как в осевом, так и в перпендикулярном ему боковом направлении, приращения продольных и поперечных деформаций меняют знак с ростом нагрузки на образец, что обусловлено закономерностями деформирования очаговой области, как квази-мягкого включения.

4. Разработана система предвестников макроразрушения образцов горных пород при одноосном сжатии, в том числе: **долгосрочный предвестник**, соответствующий порогу дилатансии и началу возникновения высокоамплитудных акустических сигналов, обусловленных возникновением

одинокных невзаимодействующих мезодефектов; а также **среднесрочный предвестник**, соответствующий возникновению мезотрещинной структуры, связанной с очаговой стадией локализации мезодефектов и разнознаковым приращением линейных деформаций в очаговой и околоочаговой областях.

5. Разработан акустико-деформационный метод определения предвестников разрушения образцов горных пород при одноосном сжатии, заключающийся в том, что методами акустической эхолокации обнаруживается и фиксируется положение очаговой области подготовки макроразрушения, а характер ее деформирования, рассматриваемый в совокупности с реверсивным характером деформирования околоочаговой области, однозначно определяет стадии развития мезотрещинного процесса.

**Достоверность результатов** исследований обеспечивается повторяемостью этапов экспериментально установленных процессов деформирования различных типов пород, возможностью экспериментального воспроизведения эффекта реверсивного линейного деформирования образцов горных пород, а также полной качественной и хорошей количественной сходимостью результатов экспериментальных и теоретических исследований.

**Научное значение** работы заключается в установлении механизма реверсивных линейных деформаций образцов горных пород при одноосном сжатии и разработке на этой основе системы комплексных акустико-деформационных предвестников.

**Практическое значение работы** состоит в разработке акустико-деформационного метода определения предвестников разрушения образцов горных пород при одноосном сжатии, включающего долгосрочный и среднесрочный комплексные акустико-деформационные предвестники.

**Апробация работы.** «Проблемы комплексного освоения минерального сырья Дальнего Востока», (г. Хабаровск, 2010 г.); «Молодёжь и научно-технический прогресс», (г. Владивосток, 2010 г.); «Международный научный форум студентов, аспирантов и молодых ученых стран Азиатско-Тихоокеанского региона», (г. Владивосток, 2012 г.); «Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах», (г. Владивосток, 2013 г.); «The 2013 ISRM International Symposium EUROCK 2013», (г. Вроцлав, Польша, 2013 г.); «Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses (EUROCK2014)», (г. Виго, Испания, 2014 г.); «ISRM Young Scholars' Symposium On Rock Mechanics 2014», (г. Сиань, Китай, 2014 г.), «5th Sino-Russian Joint Scientific-Technical Forum on Deep-level Rock Mechanics and Engineering» (г. Вэйхай, Китай, 2015 г.), Международная научная конференция «Современные технологии и развитие политехнического образования» (г. Владивосток, 2015 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 19 печатных работ, в том числе 6 в журналах, рекомендованных ВАК, 3 в журналах, индексируемых базами Web of Science и Scopus, а также 1 монография.

**Объем работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, содержит 149 страниц машинописного текста, 81 рисунок, 5 таблиц, список источников из 167 пунктов и 1 приложение.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Исследованиям напряженно-деформированного состояния образцов горных пород при нагрузках, близких к разрушающим, посвящены работы Е.Е. Дамаскинской, В.С. Куксенко, В.В. Макарова, В.А. Мансурова, А.А. Опанасюка, А.Г. Пименова, В.Н. Савельева, Г.А. Соболева, К.Т. Тажибаева, И.С. Томашевской, Я. Хамидуллина, В. Цоя, С. Chenchzhi, Z. Fang, W. Ной, О. Idehara, D.A. Lockner, В. Min, С. Tsichu и другие.

В качестве деформационного предвестника разрушения в работах С.А. Борнякова, Г.А. Гамбурцева, Г.И. Гнигиенко, Б.Г. Салова, А.А. Семерчан, Г.А. Соболева, А.В. Пономарева, F. Evison, K. Mogi, S. Nemat-Nasser, M. Obata, M. Takahashi и др. принят эффект дилатансии. В работах В.В. Макарова, и А.А. Опанасюка определена система деформационных предвестников, включающих долгосрочный, среднесрочный и краткосрочный, в работе Г.И. Гнигиенко рассмотрены вопросы надежности определения деформационных предвестников (однозначности их определения), однако связи предвестников с очаговым характером подготовки макроразрушения не рассматривались.

В работах И.С. Томашевской, Я. Хамидуллина, К.Т. Тажибаева, Ю.М. Карташова, Ir.J. Gramberg, Ir.Th.R. Selbenrath и других представлены результаты экспериментальных исследований реверсивного деформирования образца горной породы при одноосном сжатии. Аналитические исследования закономерностей деформирования образцов горных пород в упругой зоне нагружения представлены в работах В.З. Васильева, Д.В. Гусева, J.J. Kotte. В предразрушающей области нагружения закономерности деформирования образцов горных пород рассматривались М.А. Гузевым, В.В. Макаровым и А.А. Ушаковым с использованием математической модели механики дефектных сред и введением поля самоуравновешенных напряжений.

Закономерности деформирования образцов горных пород в предразрушающей области нагружения исследованы на сервоуправляемом гидравлическом жестком прессе MTS-816 с использованием в нагрузочном устройстве шаровой опоры. Методика испытаний предусматривала испытание породных образцов, торцевые поверхности которых делались плоскими, параллельными друг другу и перпендикулярными к боковой поверхности. Датчики для измерения продольных и поперечных деформаций фиксировались как в центральной, так и в торцевых частях боковой поверхности образцов по схеме, представленной на рис.1,а. Для решения поставленных задач проводились испытания серии образцов цилиндрической формы с соотношением  $h/d=2$  тензометрическим способом. Для проведения испытаний были отобраны образцы хрупких горных пород (дациты, гранодиориты, риолиты, туфобрекчии) с коэффициентом пластичности 1 –

1,1, так как накопление энергии упругой деформации в таких породах провоцирует частые проявления геодинамических явлений в массивах горных пород.

В результате экспериментов установлено, что закономерности деформирования образцов горных пород при переходе от стадии линейного деформирования (рис.1,б) к предразрушающей заключаются в значительном увеличении как продольных, так и поперечных деформаций в одних точках и одновременном появлении реверсивных продольных и поперечных деформаций в других. Затем с ростом напряжений происходит скачкообразное изменение приращений деформаций, после чего образцы разрушаются.

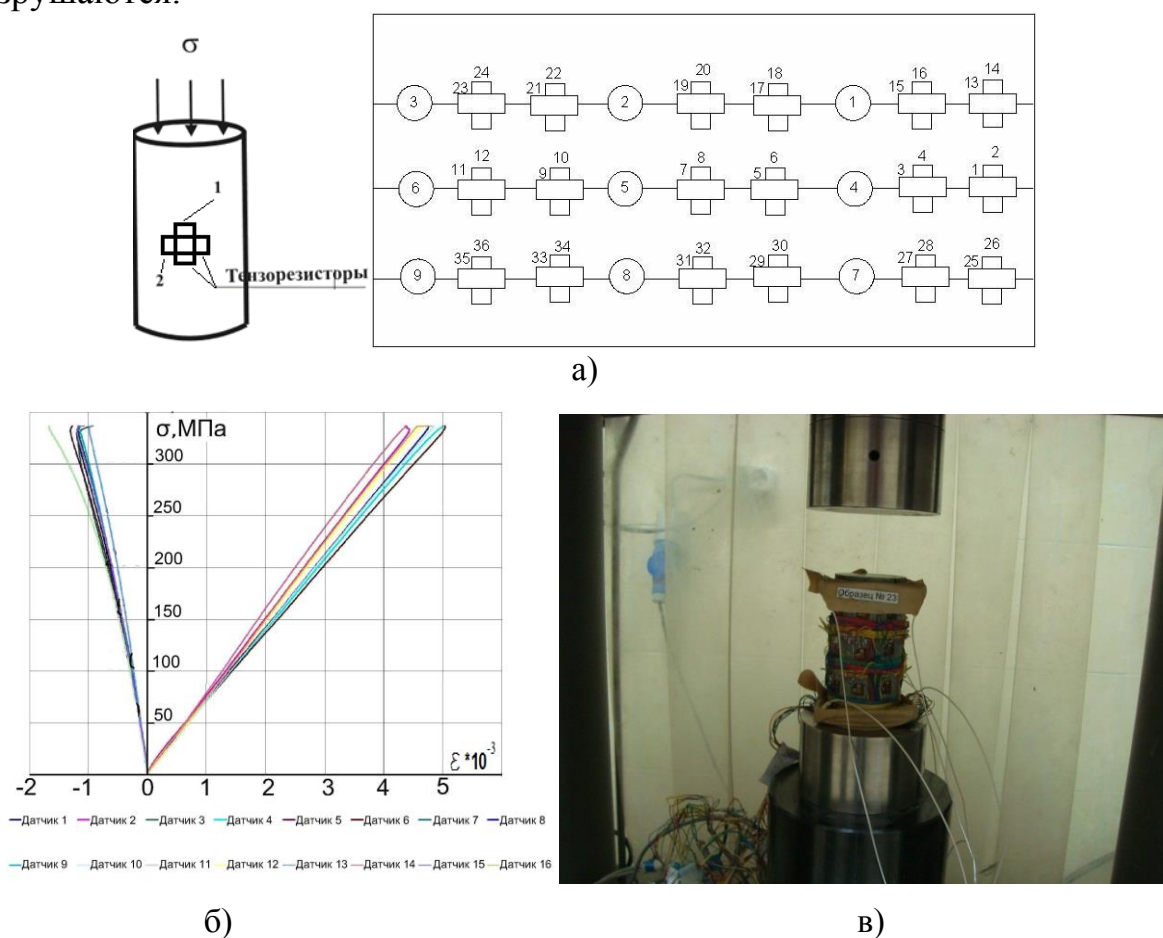


Рисунок 1. Исследование закономерностей деформирования образца горной породы: а) схема эксперимента, 1 – продольный тензорезистор, 2 – поперечный тензорезистор; б) изменение линейных деформаций образца при сжатии, в) образец перед испытанием

Для объяснения аномального характера линейных деформаций разработана гипотеза околоочагового реверсивного деформирования образцов горных пород при одноосном сжатии, заключающаяся в том, что в результате формирования очага подготовки макроразрушения образца его деформации приобретают неоднородный характер, причем в очаговой части линейные деформации приобретают большие значения, а в прилегающей околоочаговой части реализуются отрицательные приращения деформаций.



Для проверки гипотезы разработаны деформационный метод определения предвестников макроразрушения и акустико-эмиссионный метод определения положения и формы очаговой области подготовки макроразрушения образцов горных пород при одноосном сжатии.

Деформационный метод определения предвестников макроразрушения заключается в том, что измерения линейных деформаций образцов горных пород осуществляются по многоточечной схеме не только в центральной части образца, но и не менее чем по двум рядам прилегающих по высоте датчикам, располагаемым симметрично относительно центральной линии образца.

С применением разработанного деформационного метода проведены исследования реверсивного деформирования образцов горных пород в предразрушающей области нагружения при одноосном сжатии. Установлено, что в этих условиях имеют место два типа деформационных реверсивных аномалий (рис.2). Первый тип реверсивных деформаций отличается превышением отрицательных приращений продольных деформаций над отрицательным приращением поперечных. Второй тип, наоборот, показывает превышение отрицательных приращений поперечных деформаций над приращением продольных.

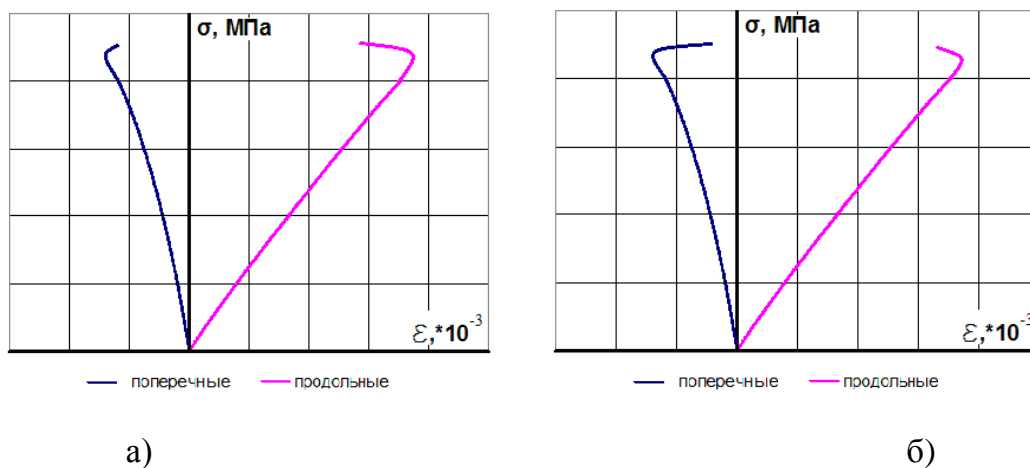


Рисунок 2. Типы реверсивных аномалий: а. Первый тип, б. Второй тип

Разработан также акустико-эмиссионный метод определения положения и формы очаговой области подготовки макроразрушения образцов горных пород при одноосном сжатии, необходимый для проверки гипотезы околоочагового реверсивного деформирования образцов горных пород в этих условиях. Метод заключается в расположении группы датчиков акустической эмиссии на поверхности образца для определения гипоцентров образующихся при сжатии мезодефектов, причем определено минимально необходимое число таких датчиков, обеспечивающий требуемую точность определения координат гипоцентров, выделен диапазон фиксируемого сигнала и разработана программное обеспечение для обработки полученных результатов.

Проведены исследования процессов формирования очагов подготовки макроразрушения образцов горных пород при одноосном сжатии,

определено, что процесс хаотического растрескивания образца завершается локализацией образования мезотрещин, причем скопление таких дефектов (очаговая область подготовки макроразрушения) может быть расположена как в центральной части образца, так и отклоняться от нее.

Разработан комбинированный метод деформационно-акустических исследований, применение которого позволило провести проверку гипотезы околоочагового реверсивного деформирования образцов горных пород при одноосном сжатии, заключающийся в том, что деформационный метод определения предвестников макроразрушения и акустико-эмиссионный метод определения положения и формы очаговой области подготовки макроразрушения объединены условиями синхронизации наблюдений, причем нагружение образца производится жесткой сервоуправляемой машиной, а число регистрирующих приборов определяется условиями необходимой точности измерений.

В результате исследования закономерностей реверсивного деформирования образцов горных пород при одноосном сжатии, проведенного деформационно-акустическим методом, гипотеза околоочагового реверсивного деформирования образцов горных пород при одноосном сжатии получила полное подтверждение. Если деформации очаговой части образца имеют аномально большие значения, то в непосредственной близости от очага по оси нагружения располагаются реверсивные деформации первого типа, а в перпендикулярном оси нагружения направлении – реверсивные деформации второго типа (рис.3).

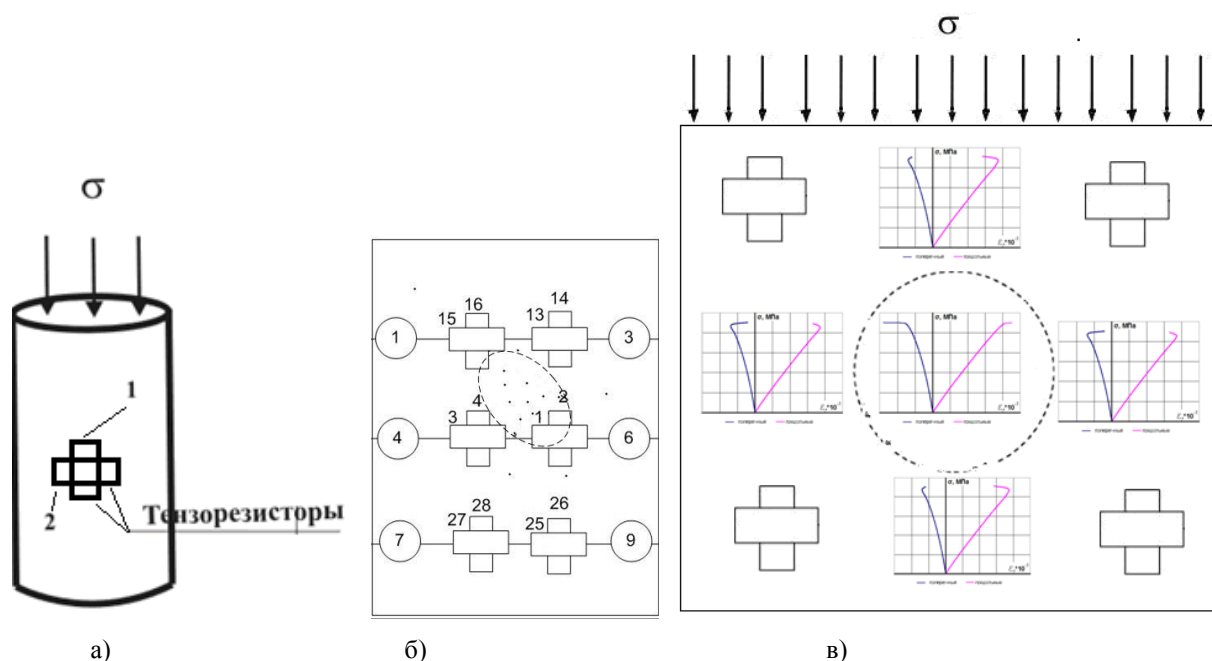


Рисунок 3. Схема акустико-эмиссионных исследований и характер деформирования образца в очаговой и околоочаговой области: а) Схема нагружения, 1 – продольный тензорезистор, 2 – поперечный тензорезистор; б) Схема расположения датчиков, в) Характер деформаций в очаговой области и в непосредственной близости от неё

Эффект реверсивного деформирования первого типа воспроизведен экспериментально в специально поставленном исследовании деформирования образца с искусственно созданным концентратором напряжения. Для этого один из торцов образца при подготовке создавали с небольшим (3 градуса) уклоном, а испытания проводили без шаровой опоры плит пресса. Показано, что в месте концентратора участки образца переходят в дилатированное состояние, что характерно для очаговой области подготовки макроразрушения, при этом в предразрушающей области нагружения участки, лежащие выше по оси действия нагрузки, показывают реверсивные деформации первого типа.

Таким образом, механизм реверсивных деформаций первого типа заключается в том, что в предразрушающей области нагружения, начиная с момента формирования очаговой области, где продольные деформации приобретают аномально большие значения, в околоочаговой области приращения продольных деформаций при увеличении напряжений имеют отрицательное значение, превышающее по величине отрицательные приращения поперечных деформаций, что обусловлено процессом относительной разгрузки напряжений в неоднородном (включающем очаг подготовки макроразрушения) материале.

Проведен также модельный эксперимент по воспроизведению реверсивных деформаций первого и второго типов вокруг квази-мягкого включения, представленного полостью, создаваемой в нагруженном образце. В результате эксперимента реверсивные аномалии первого и второго типов полностью воспроизведены экспериментально (рис. 4).

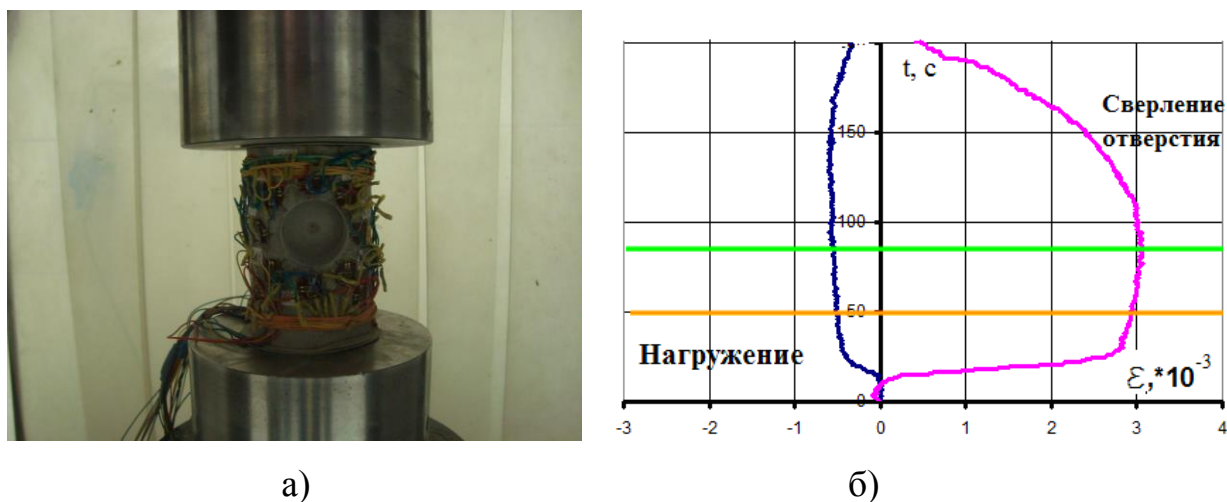


Рисунок 4. –Результаты модельного эксперимента: а) – образец после испытаний, б) – реверсивные аномалии первого типа

Предразрушающее состояние образцов горных пород описывается моделью, полученной М.А. Гузевым в рамках калибровочного подхода при введении поля самоуравновешенных напряжений. Согласно этой модели состояние предразрушения характеризуется наличием дефектов различных типов в образце. Они создают дополнительное поле напряжений  $T_{ij}$ ,

меняющее деформированное состояние материала. Это проявляется в том, что при  $P$  больше  $P_{крит}$  измеряемые на поверхности образца деформации зависят от угла  $\varphi$ , тогда как в отсутствие дефектов при  $P$  меньше  $P_{крит}$  такой зависимости от угла нет. Поскольку образец находится в равновесии, то силы, определяемые полем  $T_{ij}$ , должны быть скомпенсированы. В качестве компенсирующего берется некоторое поле  $\Pi_{ij}$ . При этом полное поле напряжений  $\Sigma_{ij}$  внутри образца равно  $\Sigma_{ij} = \Pi_{ij} + T_{ij}$ . Оно удовлетворяет уравнениям равновесия:

$$\frac{\partial \Pi_{ij}}{\partial x_j} = 0$$

и граничным условиям:

$$\Pi_{ij} n_j \Big|_{\partial V} = -T_{ij} n_j \Big|_{\partial V}.$$

Поле напряжений  $\Pi_{ij}$  и деформаций  $\varepsilon_{ij}$  связано линейными соотношениями:

$$\Pi_{ij} = A(\varepsilon_{ij} + B\varepsilon_{kk}\delta_{ij})$$

$$\text{где } A = \frac{E}{1+\nu}, \quad B = \frac{\nu}{1-2\nu}.$$

Поле  $\Pi_{ij}$  рассматривается в виде суммы классического решения  $\sigma_{ij}$  и некоторого поля  $\pi_{ij}$ :

$$\Pi_{ij} = \sigma_{ij} + \pi_{ij}.$$

Тензор  $\pi_{ij}$  связан с соответствующим тензором деформации соотношением

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

где  $a_i$  - компоненты вектора перемещений, отсчитываемые от уровня нагрузки  $P = P_{крит}$ .

В результате вычислений, получаем выражения, позволяющие описать объемное деформированное состояние образца горных пород в предразрушающей зоне нагружения:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\varphi\varphi} &= \frac{1}{2} (\varepsilon_{\varphi\varphi}^{(11)} \cos \varphi + \varepsilon_{\varphi\varphi}^{(12)} \cos 2\varphi + \varepsilon_{\varphi\varphi}^{(13)} \cos 4\varphi + \varepsilon_{\varphi\varphi}^{(14)} \sin \varphi) \cos \frac{\pi z}{h} + \\ &+ \frac{1}{2} (\varepsilon_{\varphi\varphi}^{(21)} \cos \varphi + \varepsilon_{\varphi\varphi}^{(22)} \cos 2\varphi + \varepsilon_{\varphi\varphi}^{(23)} \cos 4\varphi + \varepsilon_{\varphi\varphi}^{(24)} \sin \varphi) \cos \frac{2\pi z}{h} + \frac{1}{E} P^*, \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{1}{2} (\varepsilon_{zz}^{(11)} \cos \varphi + \varepsilon_{zz}^{(12)} \cos 2\varphi + \varepsilon_{zz}^{(13)} \cos 4\varphi + \varepsilon_{zz}^{(14)} \sin \varphi) \cos \frac{\pi z}{h} + \\ &+ \frac{1}{2} (\varepsilon_{zz}^{(21)} \cos \varphi + \varepsilon_{zz}^{(22)} \cos 2\varphi + \varepsilon_{zz}^{(23)} \cos 4\varphi + \varepsilon_{zz}^{(24)} \sin \varphi) \cos \frac{2\pi z}{h} - \frac{\nu}{E} P^*, \end{aligned}$$

где  $E$  – модуль Юнга,  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $P^*$  - значение нагрузки, превышающей упругую зону нагружения;  $\varepsilon_{\varphi\varphi}^{(ij)}$ ,  $\varepsilon_{zz}^{(ij)}$  ( $i=1,2$ ;  $j=1..4$ ) - коэффициенты, определяемые из экспериментальных данных.

Для получения коэффициентов был разработан алгоритм и составлена программа расчета деформаций. Относительная погрешность данного решения представлена в табл. 1.

Таблица 1 - Относительная погрешность математического моделирования

	$\varphi=0^\circ$	$\varphi=90^\circ$	$\varphi=180^\circ$	$\varphi=270^\circ$
Поперечная деформация				
$\varepsilon_{\varphi\varphi}^{экс} \cdot 10^{-6}$	69,2	9,3	-11,2	55,6
$\varepsilon_{\varphi\varphi}^{теор} \cdot 10^{-6}$	77,5	11	-9,5	65,5
$\delta_{\varphi}, \%$	12	18	15	17,8
Продольная деформация				
$\varepsilon_{zz}^{экс} \cdot 10^{-6}$	-52,9	58,9	-141,7	123
$\varepsilon_{zz}^{теор} \cdot 10^{-6}$	-65	52,5	-159	106
$\delta_z, \%$	17	11	12	13,8

Из таблицы видна удовлетворительная сходимость результатов теоретических и экспериментальных исследований, максимальное отклонение составляет 18%. Таким образом, моделирование предразрушающего состояния образцов горных пород при одноосном сжатии дефектной средой, поведение которой в состоянии, далеком от термодинамического равновесия, определяется действием самоуравновешенных напряжений, показывает свою достаточную эффективность.

В результате акустико-деформационных исследований установлен механизм реверсивных линейных деформаций в околоочаговой области подготовки макродефекта при одноосном сжатии образцов горных пород, заключающийся в том, что, начиная с момента формирования очаговой области, обусловленного началом взаимодействия мезодефектов, в ее окрестности как в осевом, так и в перпендикулярном ему боковом направлении, приращения продольных и поперечных деформаций меняют знак с ростом нагрузки на образец, что обусловлено особенностями деформирования очаговой области, как квази-мягкого включения.

Установленные механизмы реверсивного деформирования околоочаговой области образцов горных пород при одноосном сжатии, обусловленные закономерностями поведения дефектных сред в состоянии предразрушения, позволяют рассматривать очаговую и околоочаговую области как элементы мезотрещинной структуры очагового типа.

Характерные стадии развития мезотрещинных структур как на этапе подготовки (порог дилатансии), так и на этапе формирования (точка реверса линейных деформаций) могут быть использованы в качестве предвестников

геодинамических явлений. Это позволяет разработать акустико-деформационный метод определения предвестников разрушения образцов горных пород при одноосном сжатии, заключающийся в том, что методами акустической эхолокации фиксируется характер мезотрещинного процесса и его стадии, а методом многоточечных деформационных измерений определяются пороговый и очаговый предвестники подготовки макроразрушения, соответствующие начальным моментам развития этих стадий.

Разработанный метод определения акустико-деформационных предвестников разрушения образцов горных пород может быть использован в качестве методологической основы при анализе закономерностей подготовки и развития очагов геодинамических явлений в массивах горных пород.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Представленная диссертационная работа является законченным научным квалификационным трудом, в котором на основании выполненных автором исследований дано решение актуальной задачи геомеханики по разработке акустико-деформационного метода определения предвестников разрушения образцов горных пород при одноосном сжатии, что имеет важное значение для прогнозирования геодинамических явлений.

**Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:**

1. Определена связь основных этапов деформирования образцов горных пород с развитием мезотрещинного процесса, заключающаяся в том, что порогу дилатансии соответствует начало возникновения высокоамплитудных акустических сигналов, обусловленных одиночными не взаимодействующими дефектами, а разнознаковому приращению линейных деформаций соответствует очаговая стадия локализации мезодефектов, завершающаяся формированием устойчивой макротрещины.

2. Для объяснения аномального реверсивного характера линейных деформаций разработана гипотеза околоочагового реверсивного деформирования образцов горных пород при одноосном сжатии, заключающаяся в том, что в результате формирования очага подготовки макроразрушения образца его деформации приобретают неоднородный характер, причем в очаговой части линейные деформации приобретают экстремально большие значения, а в прилегающей околоочаговой части реализуются реверсивные линейные деформации.

3. Разработан деформационный метод определения предвестников макроразрушения, заключающийся в том, что измерения линейных деформаций образцов горных пород осуществляются по многоточечной схеме не только в центральной части образца, но и не менее чем по двум рядам прилегающих по высоте датчикам, располагаемым симметрично относительно центральной линии образца.

4. Разработан акустико-эмиссионный метод определения положения и формы очаговой области подготовки макроразрушения образцов горных пород при одноосном сжатии, необходимый для проверки гипотезы околоочагового реверсивного деформирования образцов горных пород в этих условиях. Метод заключается в расположении группы датчиков акустической эмиссии на поверхности образца для определения гипоцентров образующихся при сжатии мезодефектов, причем определено минимально необходимое число таких датчиков, обеспечивающий требуемую точность определения координат гипоцентров, выделен диапазон фиксируемого сигнала и разработана программное обеспечение для обработки полученных результатов.

5. Разработан комбинированный метод деформационно-акустических исследований, применение которого позволило провести проверку гипотезы околоочагового реверсивного деформирования образцов горных пород при одноосном сжатии, заключающийся в том, что деформационный метод определения предвестников макроразрушения и акустико-эмиссионный метод определения положения и формы очаговой области подготовки макроразрушения объединены условиями синхронизации наблюдений, причем нагружение образца производится жесткой сервоуправляемой машиной, а число регистрирующих приборов определяется условиями необходимой точности измерений.

6. Установлен эффект реверсивных линейных деформаций первого типа, который заключается в том, что в предразрушающей области нагружения, в очаговой области подготовки макроразрушения продольные и поперечные деформации приобретают аномально большие значения, а в околоочаговой области приращения продольных деформаций при увеличении напряжений имеют отрицательные значения, причем отрицательные приращения продольных деформаций превышают по величине отрицательные приращения поперечных деформаций, что обусловлено процессом перераспределения напряжений в неоднородном (включающем очаговую область подготовки макроразрушения) материале.

7. Установлен эффект реверсивных деформаций второго типа, который заключается в том, что в предразрушающей области нагружения, начиная с момента формирования очаговой области, где поперечные деформации приобретают аномально большие значения за счет раскрытия взаимодействующих мезодефектов, в околоочаговой области образца приращения поперечных деформаций при увеличении напряжений имеют отрицательное значение, превышающее по величине отрицательные приращения продольных деформаций, что обусловлено процессом перераспределения напряжений в неоднородном (включающем очаг подготовки макроразрушения) материале.

8. Установлен механизм реверсивных линейных деформаций в околоочаговой области формирования макродефекта при одноосном сжатии образцов горных пород, заключающийся в том, что, начиная с момента

формирования очаговой области, обусловленного началом взаимодействия мезодефектов, в окрестности очага как в осевом, так и в перпендикулярном ему боковом направлении, приращения продольных и поперечных деформаций меняют знак с ростом нагрузки на образец, что обусловлено особенностями деформирования очаговой области, как квази-мягкого включения.

9. Установлен эффект формирования в образцах горных пород в предразрушающей области нагружения мезотрещинных структур, обусловленных прохождением очаговой стадии подготовки макроразрушения, заключающийся в том, что при локализации мезотрещинного процесса в очаговой области скорость акустической эмиссии достигает максимума, при этом линейные деформации в очаговой области приобретают экстремальные значения, а в околоочаговой области линейные деформации приобретают реверсивный характер.

10. Разработана система предвестников разрушения, в том числе: долгосрочный предвестник, соответствующий порогу дилатансии и началу возникновения высокоамплитудных акустических сигналов, обусловленных возникновением одиночных не взаимодействующих мезодефектов; а также среднесрочный предвестник, соответствующий возникновению мезотрещинной структуры, связанной с очаговой стадией локализации мезодефектов и разнознаковым приращением линейных деформаций, завершающейся формированием устойчивого макродефекта.

11. Разработаны программы, реализующие алгоритмы расчета деформаций по высоте и периметру образцов горных пород с учетом развития в них мезотрещинных структур в предразрушающей области нагружения и получены теоретические зависимости приращений линейных и объемных деформаций образцов горных пород в предразрушающей области нагружения, причем определен осциллирующий характер приращений деформаций как по высоте, так и по периметру образцов при одноосном сжатии. Отклонение теоретических значений от экспериментальных не превышает 18 %.

12. Разработан акустико-деформационный метод определения предвестников разрушения образцов горных пород при одноосном сжатии, заключающийся в том, что методами акустической эхолокации фиксируется характер мезотрещинного процесса и его стадии, а методом многоточечных деформационных измерений определяются долгосрочный и среднесрочный предвестники подготовки макроразрушения, соответствующие начальным моментам развития этих стадий.



**Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:**

Статьи в журналах и изданиях «Перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий» ВАК Минобрнауки России:

1. Ксендзенко Л.С., Голосов А.М., Макаров В.В., Опанасюк Н.А. Напряженно-деформированное состояние сильно сжатого массива вокруг закрепленной выработки // Освоение подземного пространства мегаполисов: Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала). М.: Горная книга. – 2013. – No OB7. – 256 с., С. 110-116

2. Ксендзенко Л.С., Голосов А.М., Макаров В.В., Опанасюк Н.А. Механизм реверсивных деформаций сильно сжатых образцов горных пород как основа прогнозирования геодинамических явлений и снижения рисков строительства // Освоение подземного пространства мегаполисов: Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала). М.: Горная книга. – 2013. – № OB7. – С. 215-225

3. Ксендзенко Л.С., Голосов А.М., Макаров В.В., Опанасюк Н.А. Закономерности зонального характера деформирования и разрушения массива вокруг горных выработок в сильно сжатом массиве горных пород и совершенствование технологии подземных сооружений // Освоение подземного пространства мегаполисов: Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала) Mining Informationaland analytical bulletin (Scientific and technical journal). М.: Горная книга. – 2013. – No OB7. – 256 с., С.226-239

4. Ксендзенко Л.С., Голосов А.М., Макаров В.В., Опанасюк Н.А. Метод определения параметров модели зонального разрушения массива подземных выработок как основа прогноза характеристик структур разрушения и выбора типа обделок подземных сооружений // Освоение подземного пространства мегаполисов: Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала) Mining Informationaland analytical bulletin (Scientific and technical journal). М.: Горная книга. – 2013. – No OB7. – 256 с., С.240-247

5. Голосов А.М., Гнитиенко В.В. Комплексный метод контроля образцов горных пород в предразрушающем состоянии//Горный информационно-аналитический бюллетень №01 – М: МГГУ, 2012

6. Голосов А.М. Исследование акустической эмиссии в образцах горной породы//Горный информационно-аналитический бюллетень №01 – М: МГГУ, 2013

Статьи в журналах, рецензируемых базами Web of Science и Scopus:

7. Макаров В.В., Голосов А.М., Опанасюк Н.А., Гунько А.С. Laboratory studies of the mechanisms preparation of brittle rock samples failure // Transit Development in Rock Mechanics-Recognition, Thinking and Innovation - Proceedings of the 3rd ISRM Young Scholars Symposium on Rock Mechanics, 2014, pp. 155-158

8. Макаров В.В., Ксендзенко Л.С., Голосов А.М., Опанасюк Н.А. Reversible deformation phenomena of a high stressed rock samples // Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses - Proceedings of EUROCK 2014, ISRM European Regional Symposium, pp. 267-272

9. Макаров В.В., Ксендзенко Л.С., Голосов А.М., Опанасюк Н.А. Periodical Character of Failure Near the Openings in High-Stress Rock Mass Conditions// The 2013 ISRM International Symposium 21-26 September 2013, Wroclaw, Poland, pp. 519-523

Монография:

10. Макаров В.В., Ксендзенко Л.С., Опанасюк Н.А., Голосов А.М. Закономерности деформирования и разрушения сильно сжатых горных пород и массивов: монография [Электронный ресурс] / Инженерная школа ДВФУ. – Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2014. – [250 с.] – 1 CD. – (Серия «Геология, поиск и разведка полезных ископаемых», ISSN 2305-4158).

В прочих изданиях:

11. Макаров В.В., Опанасюк А.А., Ксендзенко Л.С., Опанасюк Н.А., Гнитиенко В.В., Голосов А.М. Определение параметров модели зонального разрушения сильно сжатого массива горных пород вокруг подземных выработок по данным экспериментов с образцами горных пород// Theory and practice of geomechanics for effectiveness the mining production and the construction: proceeding of IV<sup>th</sup> International Geomechanics Conference. – Bulgaria, 2010, 3-6 June. - P. 404-409

12. Голосов А.М. Deformation Tests of Samples of Rocks on Uniaxial Compression // Materials of the Tenth International Young Scholars' Forum of the Asia-Pacific Region Countries. Vladivostok, Russia. Far-Eastern National Technical University. 2010

13. Макаров В.В., Ксендзенко Л.С., Голосов А.М., Опанасюк Н.А. System of trustworthy deformational precursors of highly stressed rock samples failure // Deep Mining 2012, Proceedings of international Conference pp. 325-337

14. А.М. Голосов Фиксация этапов трещинообразования в образце горной породы деформационным и геоакустическим методами // Материалы Международного научного форума студентов, аспирантов и молодых ученых стран Азиатско-Тихоокеанского региона, 14-17 мая 2012 г., Владивосток Ч. 1, стр. 245-249

15. В.В. Макаров, Л.С. Ксендзенко, А.М. Голосов, Н. А. Опанасюк. Влияние отпора крепи на параметры зональной структуры разрушения сильно сжатого массива вокруг закрепленной выработки // Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах Материалы 4-й Российско-Китайской научной конференции, 27-31 июля 2014 г., Владивосток, с. 73

16. В.В. Макаров, Н. А. Опанасюк, Л.С. Ксендзенко, А.М. Голосов Закономерности деформирования и разрушения вмещающих пород вокруг горных выработок в сильно сжатом массиве. // Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных

ископаемых на больших глубинах Материалы 4-й Российско-Китайской научной конференции, 27-31 июля 2014 г., Владивосток, с. 74

17. В.В. Макаров, А.М. Голосов, Л.С. Ксендзенко, Н. А. Опанасюк. Возможности прогнозирования параметров зональной структуры разрушения сильно сжатого массива вокруг подземных выработок.// Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах Материалы 4-й Российско-Китайской научной конференции, 27-31 июля 2014 г., Владивосток, с. 75

18. В.В. Макаров, А.М. Голосов, Л.С. Ксендзенко, Н. А. Опанасюк. Реверсивные деформации сильно сжатых образцов горных пород: механизм и предвестники.// Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах Материалы 4-й Российско-Китайской научной конференции, 27-31 июля 2014 г., Владивосток, с. 76

19. Голосов А.М., Макаров В.В., Опанасюк Н.А., Ксендзенко Л.С. Complex Method of Detection Reliable Precursors of Stressed Rock Samples Failure // Труды Международной научной конференции «Современные технологии и развитие политехнического образования», г. Владивосток, 14-18 сентября 2015 г., с. 175

**ГОЛОСОВ Андрей Михайлович**

**РАЗРАБОТКА АКУСТИКО-ДЕФОРМАЦИОННОГО МЕТОДА  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДВЕСТНИКОВ РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ  
ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ**

**Автореферат**

Подписано в печать . Формат 60x84/16.

Усл. печ. л. 1,16. уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ