

Российская Академия Наук
Отделение Наук о Земле РАН
Российский фонд фундаментальных исследований
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН
Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН
Горный институт УрО РАН

**XI всероссийская школа-семинар
с международным участием
«Физические основы прогнозирования
разрушения горных пород»**

Тезисы докладов

Пермь 2019

УДК 550.3
ББК 26.21
Ф 50

«Физические основы прогнозирования разрушения горных пород». – М.: ИФЗ РАН, 2019, 88 с.

Сборник содержит тезисы докладов, представленные на XI всероссийской школе-семинаре с международным участием, состоявшейся в Перми 14-18 октября 2019 г. Рассматривается широкий круг вопросов, касающихся природы и развития катастрофических явлений в консолидированных средах. Анализируются многопараметрические нелинейные процессы, приводящие к разрушению горных пород (землетрясения, горные удары, оползни и т.п.). Затрагиваются вопросы деструкции и других твердых тел.

Издание представляет интерес для специалистов научных и производственных организаций, занимающихся геофизическими исследованиями природных и природно-техногенных объектов.

Мероприятие проводится при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-05-20135

Главный редактор

член-корреспондент РАН Соболев Г.А. (ИФЗ РАН)

Ответственный редактор

кандидат технических наук Шулаков Д.Ю. («ГИ УрО РАН»)

Редакционная коллегия: д.ф.-м.н. Завьялов А.Д. (ИФЗ РАН), д.ф.-м.н. А.В.Пономарев (ИФЗ РАН)

Рецензенты: чл.-корр. РАН Маловичко А.А. (ФИЦ ЕГС РАН),
д.г.-м.н. Бычков С.Г. («ГИ УрО РАН»)

ISBN 978-5-91682-048-5



© «ГИ УрО РАН», ИФЗ РАН 2019

ИСТОРИЯ ШКОЛ-СЕМИНАРОВ
«ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД»

Традиция проведения школ-семинаров «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород» берет свое начало от первой школы, проведенной в г. Боржоми (Грузинская ССР) в 1982 г. Название «школа-семинар» не означает в данном случае только обучение молодых исследователей. Их главной задачей является обмен знаниями ученых, работающих в различных областях наук и изучающих природу и развитие катастрофических явлений в консолидированных средах, к которым относятся и горные породы. За прошедшие почти 40 лет было проведено 11 школ-семинаров. Десять предыдущих школ перечислены ниже. Половина из них была проведена при спонсорской поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), а школы-семинары, проходившие в 2010 и 2016 гг., получили финансовую поддержку от Международного Союза по геодезии и геофизике (IUGG) и Международной Ассоциации сейсмологии и физики недр Земли (IASPEI).

- Всесоюзная школа-семинар "Физические основы прогнозирования разрушения горных пород". Грузинская ССР, г. Боржоми, 11-17 октября 1982 г.
- Всесоюзная школа-семинар "Физические основы прогнозирования разрушения горных пород". Киргизская ССР, оз. Иссык-Куль, п. Долинка, 3-12 сентября 1985 г.
- Всесоюзная школа-семинар "Физические основы прогнозирования разрушения горных пород". РСФСР, г. Иркутск, 14-22 сентября 1988 г.
- Всесоюзная школа-семинар "Физические основы прогнозирования разрушения горных пород". РСФСР, г. Зеленогорск, сентябрь 1991 г.
- 5-ая Всероссийская школа-семинар "Физические основы прогнозирования разрушения горных пород". Россия, Ярославская обл., Геофизическая обл. "Борок", 3-7 октября 1994 г.
- Международная школа-семинар «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород». Россия, г. Красноярск, 9-15 сентября 2001 г. *(при спонсорской поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, РФФИ).*

- 7-ая международная школа-семинар «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород». Россия, пос. Борок, 17-21 октября 2005 г. *(при спонсорской поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, РФФИ).*
- 8-ая международная школа-семинар «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород». Россия, г. Санкт-Петербург, 24-29 октября 2010 г. *(при спонсорской поддержке Международного Союза по геодезии и геофизике, IUGG; Российского фонда фундаментальных исследований, РФФИ).*
- 9-ая международная школа-семинар «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород». Россия, г. Иркутск, 2-6 сентября 2013 г. *(при спонсорской поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, РФФИ).*
- 10-ая международная школа-семинар «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород». Россия, г. Апатиты, 13-17 июня 2016 г. *(при спонсорской поддержке Международного Союза по геодезии и геофизике, IUGG; Международной Ассоциации сейсмологии и физики недр Земли, IASPEI; Российского фонда фундаментальных исследований, РФФИ).*

Главными участниками всех школ были геофизики (главным образом, сейсмологи), физики (специализирующиеся в области прочности твердого тела), горняки и геологи. Сопредседателями оргкомитетов всех школ были Г.А. Соболев (Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН) и В.С. Куксенко (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, РАН). Школы в Боржоми, Иркутске и Красноярске были организованы благодаря усилиям Т.Л. Челидзе, В.В. Ружича и В.А. Мансурова. Большую организационную работу выполняли ученые секретари школ Е.Н. Седова (до 2003 г.) и А.Д. Завьялов (2003-2016 гг.).

Отличительной чертой данных школ от научных конференций всегда являлась возможность детально обсудить наиболее интересные проблемы. Если время докладчиков и ограничивалось, то не жестко, а дискуссии по докладам могли продолжаться часами. Иногда этому способствовала и погода (сплошные дожди), как, например, во время проведения школы-семинара в Красноярске.

Главная задача школ – лучше понять природу многопараметрических, нелинейных процессов, приводящих к разрушению горных пород (землетрясения, горные удары, оползни и т.п.). Параллельно затрагивались вопросы деструкции и других твердых

тел. Важным прикладным выходом является совершенствование методов прогнозирования такого вида катастроф. Для прогресса в этом направлении, с одной стороны, необходим совместный анализ достижений в области теории, лабораторного эксперимента и полевых наблюдений. С другой стороны, важно участие специалистов, работающих в разных областях науки.

В последнее время резко возрос интерес к изучению процессов разрушения в условиях Земли с учетом представления о ней как о нелинейной диссипативной системе. Теория динамики диссипативных систем интенсивно развивается в биологии, медицине, некоторых разделах физики и химии. Ее еще предстоит создавать применительно к земным условиям с учетом гетерогенности и неоднородности литосферы по прочности и напряженному состоянию, разномасштабности протекающих в ней процессов и многочисленных флуктуаций внешнего и внутреннего происхождения. Для развития этого направления большое значение будут иметь лабораторные и натурные эксперименты.

Заместитель председателя оргкомитета, д.ф.-м.н.

Завьялов А.Д.

СИЛЬНЕЙШИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ВАНСКОГО РАЙОНА 1976 И 2011 ГГ. И РОЕВАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ НА ФОНЕ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ S-ВОЛН

Аптикаева О.И.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

Работа посвящена рассмотрению положения очагов землетрясений 1976 и 2011 гг. и роев землетрясений в районе озера Ван на фоне неоднородностей поля поглощения поперечных волн. Поле поглощения получено методом короткопериодной коды, когда по набору огибающих коды для многих землетрясений строится распределение поля поглощения в верхней мантии. В основу метода положено предположение, что на достаточно больших временах кода-волны сравнительно круто пересекают низы коры и верхи мантии и несут информацию о строении среды в области между эпицентром и станцией. Существование в этой области зон повышенного или пониженного поглощения S-волн отражается на характеристиках коды, приводя соответственно к заметному увеличению или уменьшению ее наклона. Таким образом, огибающие коды состоят из участков, соответствующих большему или меньшему затуханию, которые

могут быть описаны выражением, имеющим вид: $A(t) \sim \exp\left(-\frac{\pi t}{Q_s T}\right) / t$, где

$A(t)$ – амплитуда коды в окрестностях времени t ; Q_s – эффективная добротность; T – период колебаний.

В районе озера Ван выделяются блоки слабого поглощения изометричной формы, в которых поглощение уменьшается в направлении от границ к центральным областям блоков, где добротность достигает 300 и даже 700. Среди зон сильного поглощения наиболее заметна широкая зона севернее 39 с.ш., связанная с Северо-Анатолийским разломом, где $Q \sim 80-110$.

Эпицентры сильнейших землетрясений района, в том числе и землетрясений 1976 и 2011 гг., как правило, приурочены к границам добротных блоков и ослабленных зон.

Сейсмическая ситуация, предшествовавшая землетрясению 1976 г., отличалась от таковой перед землетрясением 2011 года. В первом случае за год до землетрясения на северо-востоке от очага будущего толчка сформировалась сейсмическая брешь. Во втором случае за несколько месяцев до главного толчка на северо-западе от области очага произошла роевая серия землетрясений.

Область локализации роевой серии изометрична в плане и вытянута по вертикали (глубины очагов ~3-30 км). Подобные структуры в тектонически активных зонах интерпретируются как локальные источники деформаций (за счет проникновения в пределы верхней коры глубинных флюидов, привносящих дополнительный минеральный материал, что обуславливает субгоризонтальные напряжения распора). Такие сейсмогенные области, как правило, совпадают с ослабленными зонами сильного поглощения S-волн.

Предполагается, что рой, возникший перед землетрясением 2011 г., связан с каналом миграции глубинных флюидов повышенной проводимости. Такие объекты принято интерпретировать как локальные сейсмогенные источники.

ОТРАЖЕНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ И ГЕОДЕФОРМАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СПЕКТРОГРАММАХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Басов А.Д., Романевич К.В., Шляев С.А., Андрианов С.В.
ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс», г. Санкт-Петербург

На транспортных тоннелях трассы Адлер – Красная Поляна, расположенной в сейсмоактивной зоне Северного Кавказа (до 9 баллов и выше) с активным проявлением оползневых процессов, действует разработанная институтом ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс» (ЛМГТ) система геотехнического мониторинга, включающая геомеханические и геофизические методы контроля напряженно-деформированного состояния массива горных пород и обделок. По комплексу данных этих методов с 2013 г. в обделках тоннелей и вмещающих массивах определяются напряжения, анализируются сейсмические события и изменение уровня естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ) – в целом эта информация является индикатором геодинамической активности территории.

Важным условием безопасного состояния любого наземного или подземного объекта является выявление и оценка уровня деформационного воздействия от природных и техногенных источников для сравнения этого воздействия с нормативным значением деформационной устойчивости объекта. В настоящее время по данным мониторинга установлены сезонные изменения напряжений за счет годовых колебаний температуры в обделках тоннелей (в среднем на $+5^{\circ}\text{C} \div +6^{\circ}\text{C}$). За период наблюдений с

2013 г. скорость накопления остаточных деформаций в обделках составила в среднем 0,3 МПа/год.

С целью изучения влияния короткопериодных знакопеременных повторяющихся техногенных (вибрационных) и геодеформационных воздействий оползней и землетрясений на напряженно-деформированное состояние обделок тоннелей нами начаты опытные работы по профилированию методом ЕЭМИ по тоннелям и регистрации сейсмических колебаний и сигналов ЕЭМИ от проезжающих железнодорожных составов.

Получены первые результаты, которые показывают, что проезд железнодорожного состава по тоннелю сопровождается сейсмическими колебаниями с максимальными ускорениями порядка 0,02 g по вертикальной компоненте на частотах ~100 Гц и генерированием электромагнитных импульсов от возникающих микротрещин в окружающих горных породах на частотах в десятки кГц, что находит отражение на спектрограммах акселерограмм и ЕЭМИ. По предварительным данным, остаточные деформации обделок от разовых проездов железнодорожных составов не зафиксированы. Об интенсивности процессов деформирования обделок можно судить по положению частот максимумов спектров ЕЭМИ и их амплитудных уровней на спектрограммах.

КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Бельтюков Н.Л., Ударцев А.А.
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Безопасные условия ведения горных работ на месторождениях водорастворимых руд в основном достигаются применением камерной системы разработки с оставлением поддерживающих междуканальных целиков, которые обеспечивают сохранность водозащитной толщи пород между кровлей верхнего отрабатываемого пласта и почвой водоносного горизонта в течение всего срока службы рудника. В связи с этим, актуальным является вопрос своевременного и эффективного контроля состояния грузонесущих элементов системы разработки на калийных рудниках.

При решении задачи контроля устойчивости горных выработок и подземных сооружений широкое распространение получил метод акустической эмиссии (АЭ). Данный метод основан на регистрации в массиве упругих волн, возникающих при

деформировании и разрушении пород, вследствие перераспределения напряжений, вызванного ведением горных работ. Несмотря на большое количество примеров использования метода АЭ при контроле подземных сооружений в массиве соляных пород, вопрос существования надежных критериев их устойчивого состояния до сих пор остается открытым.

С целью исследования характера изменения параметров акустической эмиссии при разрушении соляных пород выполнены лабораторные эксперименты по испытанию образцов на электромеханическом прессе «Zwick Z400» в условиях различных режимов нагружения. Прием импульсов осуществлялся с помощью установленных на образец широкополосных АЭ-преобразователей, сигнал с которых регистрировался акустико-эмиссионной аппаратурой «Vallen AMSY-6».

В результате проведенных исследований получены качественные закономерности изменения параметров импульсов акустической эмиссии в зависимости от степени нарушенности образцов. Установленные закономерности позволяют оценить стадию поврежденности соляных пород, находящихся в условиях длительного нагружения, и могут быть использованы при разработке АЭ-критериев устойчивого состояния горных выработок в соляном массиве.

НОВЫЙ ПОДХОД К ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ МРАМОРА НА ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ И ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ. ИНФОРМАТИВНОСТЬ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ.

¹Богомолов Л.М., ¹Закупин А.С., ²Мубассарова В.А., ²Сычев В.Н.

¹*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск*

²*Научная станция РАН, г. Бишкек, Кыргызстан*

В докладе представляются результаты о деформационных зависимостях образцов мрамора в форме прямоугольных параллелепипедов при одноосном сжатии. Основное внимание обращено на вариации скорости той или иной компоненты деформации при дополнительном воздействии электромагнитного (ЭМ) поля. Аппаратурное обеспечение экспериментов позволило получить оценки напряжений, возникающих в направлениях перпендикулярно оси главного сжатия в условиях испытания без смазки на торцах. Для этого предложен следующий подход. В экспериментах проводилась непрерывная регистрация действующей нагрузки,

продольного укорочения и двух компонент поперечного удлинения образцов. Изменение поперечных размеров бралось примерно посередине между торцами. Изменения размеров пересчитывались на деформации, при этом оценки продольной деформации получаются менее надежными из-за неоднородности деформации вдоль оси главного сжатия (имеется различие между зонами у торцов и около экваториальной плоскости). Поперечные деформации определяются для средней части образца. Для оценок боковых напряжений использовалась гипотетическая модель, предполагающая различными три компоненты деформаций и напряжения. В качестве известных рассматривались зависимости от времени главного напряжения (σ_1) и поперечных деформаций (ϵ_2 , ϵ_3). Искомыми являлись поперечные напряжения (σ_2 , σ_3) и осевая деформация (ϵ_1), которые определялись при решении системы из трех уравнений гипотетической. Для минимизации различия между экспериментальной и расчетной осевой деформации в начале нагружения подбирались значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона для каждого образца. Далее, по мере нагружения, это различие может увеличиваться, как из-за изменения модулей, так и из-за отклонений от гипотетической модели. Последнее проявлялось по быстрому нарастанию невязки ϵ_1 при напряжениях более 0,7-0,8 от разрушения. Для меньших напряжений также построены зависимости от времени параметра Лодэ-Надаи. Результаты дают некоторую информацию о напряженном состоянии образцов в период времени, когда наблюдался отклик акустической эмиссии на воздействие ЭМ полей.

СМЕНА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПО ДАННЫМ КОЭФФИЦИЕНТА ЛОДЕ–НАДАИ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА ОБРАЗЦАХ ГОРНЫХ ПОРОД

Бубнова Н.Я., Лементуева Р.А., Треусов А.В.
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

Рассмотрена взаимосвязь главных компонент и изменение коэффициента Лодэ-Надаи в процессе экспериментов на образцах горных пород при длительном деформировании (до суток). Рассмотрены стадии переиндексации (смена знака) в процессе деформирования образца и в период образования магистральной трещины.

Авторами была использована методика нагружения, основанная на применении невзрывной разрушающей смеси (НРС) [1]. Для проведения новых экспериментов были подготовлены образцы различных по минеральному составу и структурам горных пород. При проведении длительного эксперимента исследовались закономерности

изменения главных деформаций E_1 , E_2 , E_3 , средней объемной деформации θ , максимальной деформации сдвига Υ , коэффициента Лоде–Надаи μ [1].

Было установлено, что на начальном этапе нагружения коэффициент Лоде–Надаи понижается $\sim$ от 0,5 до -1 (отн. ед.). В представленной работе изменение его значений при разной методике нагружения стремится, главным образом, к предельным значениями от $+1$ до -1 . Результаты показывают, что деформирование образца приводит к переиндексации значений μ , затем наступает этап стабилизации и далее значения вновь повышаются. На стадии «предразрушение» отмечена новая переиндексация μ , наблюдается изменение величины μ в сторону повышения. Именно на этой стадии возникает магистральная трещина. По данным акустических наблюдений отмечался сигнал АС, максимальный за все время наблюдений. Можно сделать вывод, что диапазон переиндексации зависит от напряженного состояния и от места наблюдения (установки тензодатчиков) в разных зонах на образцах.

При изучении деформационных процессов в сейсмоактивных районах часто отмечалось, что сейсмические события происходят на стадии максимальных значений или падения напряжений в зоне возникновения землетрясения [3]. Проведено сравнение с натурными наблюдениями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ребецкий Ю.Л., Лементуева Р.А., Дьяур Н.И., Михайлова А.В. Соподчиненность микроструктурных деформаций и хрупкого микроразрушения // Докл. РАН. 2005. Т. 403, № 2. С. 253–257.
2. Лементуева Р.А., Бубнова Н.Я., Треусов А.В. Особенности динамики формирования магистральной трещины // Физика Земли. 2014. №1. С. 33–39.
3. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003.

КОМПЛЕКС ОРГАНИЗАЦИОННЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ МЕР ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ СЕТИ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Бутырин П.Г., Кичигин М.В., Верховланцев Ф.Г.
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

В комплексе геофизических методов, предназначенных для контроля напряженно-деформированного состояния породного массива, весомый вклад вносит

сейсмологический мониторинг. Уже более двух лет для большинства объектов мониторинга используются 27 сейсмических регистраторов «Ермак-5», разработанных в «ГИ УрО РАН» [1], это: территория г.Березники (БКПРУ-1); территория г.Соликамск (СКРУ-2); сейсмологический мониторинг зоны Краснослободского разлома РУ-2 ОАО «Беларуськалий» (Республика Беларусь); пять регистраторов применяются при проведении полевых исследований.

Организационные меры повышения надежности:

1. Создание ремонтной базы для быстрой замены неисправных приборов и их компонентов.
2. Обеспечение регулярного сбора и анализа диагностической информации.
3. Ведение журналов жизненного цикла всех приборов по уникальным заводским номерам.
4. Обеспечение своевременного обновления аппаратно-программных средств локально или средствами удаленного доступа с проверкой целостности файла микропрограммы.

Технические меры повышения надежности:

1. Сохранение информации в системном журнале, в случае сбоя или отказа файловой системы, а также автоматически перезагрузка.
2. Режим работы без карты памяти, при этом сохраняется управление файловой системой, возможно форматирование карты памяти и автоматическое восстановление конфигурации.
3. Сторожевой таймер «WatchDog» - подсистема вызывающая аппаратный перезапуск процессора через 8 секунд при аппаратном сбое, а также «Long time WatchDog» - программный сторожевой таймер с периодом переполнения и сброса 900 сек.
4. Регистраторы на труднодоступных объектах дополнительно оснащены внешними таймерными реле.

Комплекс вышеперечисленных мероприятий и инструментов позволяет успешно эксплуатировать и тестировать все регистраторы, производить корректировку после сбоев и своевременно обновлять микропрограммы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Butyrin P.G., Verkholtantsev F.G., Verkholtantsev A.V., Shulakov D.Y. Digital Seismic Logger “Ermak-5”. Experience of Development and Implementation // ISSN 0747-9239, Seismic Instruments, 2019, Vol. 55, No. 2, pp. 117–128. DOI: 10.3103/S0747923919020051.

МЕХАНИЗМ И ДИНАМИКА РАЗРУШЕНИЯ НАПРЯЖЕННЫХ ГРАНИТОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

^{1,2}Веттегрень В.И., ²Кулик В.П., ^{1,2}Мамалимов Р.И., ²Махмудов Х.Ф., ²Щербаков И.П.

¹*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва*

²*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. С-Петербург*

Электрический пробой воздуха около одной из поверхностей образцов гранитов (плагиигранита, габбро-диабазы и аляскита), мощность которого составляет 0,2 Дж, вызывает выделение струй плазмы с противоположной поверхности. Плазма состоит из электронов, положительно заряженных ионов и атомов Si, O и др. Длительность выделения каждой из струй не превышает ~10 нс, а величина интервала между ними изменяется от ~10 до ~300 мкс. Предполагается, что ударная волна увеличивает деформацию кристаллической решетки в скоплениях дислокаций в пересекающихся плоскостях скольжения до таких значений, при которых начинают пересекаться уровни основного и возбужденного состояний. Это приводит к переходам между электронными уровнями, распаду межатомных связей и вылету положительно заряженных ионов и электронов. Ионы вылетают в моменты выхода на поверхность дислокаций. Сжимающая нагрузка подавляет процесс выхода дислокаций на поверхность образцов и уменьшает интенсивность пучков вылетающих ионов. После воздействия ударной волны на поверхности гранитов на них образуются диаплектические стекла.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ РОСТА И РАЗМЕРОВ МИКРОТРЕЩИН, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ТРЕНИИ ГОРНЫХ ПОРОД

^{1,2}Веттегрень В.И., ¹Пономарев А.В., ^{1,2}Мамалимов Р.И., ¹Щербаков И.П.

¹*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва*

²*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург*

При помощи метода трибolumинесценции с наносекундным временным разрешением впервые проведены исследования скорости роста и размеров микротрещин, образующихся в поверхностном слое рифейского песчаника, тоналита и базальта при трении на лабораторной установке. Найдено, что при разрушении кристаллических решеток плагиоклазов, входящих в состав этих пород, возникают сигналы люминесценции. Каждый сигнал соответствует микротрещине, поверхность которой содержит электронно-возбужденные свободные радикалы $\equiv\text{Si-O}\cdot$, ионы Fe^{3+} и

ловушки электронов. Микротрещины образуются при прорыве барьеров, препятствующих движению дислокаций по плоскостям скольжения. Размеры микротрещин изменяются от ~ 3 до ~ 8 мкм. Скорость роста микротрещин меньше скорости упругой волны и варьирует от $\sim 1,5$ до 2 раз. Определены температуры в зоне трения. Найдено, что они не превышают 120°C .

РАЗРУШЕНИЕ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ДВУХОСНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Вознесенский А.С., Красилов М.Н., Куткин Я.О., Тютчева А.О., Лучникова А.О.
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

Усталостные циклические нагружения горных пород встречаются в ряде объектов транспорта, строительства и горного производства, таких, как горная порода при дроблении, бурении или взрыве; массив пород вокруг горных выработок, наполнитель в железо- и асфальтобетоне, щебень в полотне железной дороги при воздействии движущегося транспорта; массивы пород, в которых закреплены основания мачт, ветряных энергетических установок при воздействии ветра и др. Цель – сравнительная оценка влияния последовательных циклических силовых воздействий в одном и двух направлениях на прочность и акустические свойства горных пород. Исследования проводились при сжатии образцов известняков Касимовского месторождения размерами $25 \times 50 \times 50$ мм. Образцы испытывались парами – один образец в серии из M нагружений по одной оси, другой – в двух последовательных сериях по $M/2$ нагружений в перпендикулярных направлениях по длинным осям. Проведено две группы испытаний сериями при постоянной максимальной нагрузке цикла в серии в первой группе и при увеличивающейся нагрузке от серии к серии во второй группе. Перед испытаниями и между сериями производилось измерение скоростей продольной и поперечной упругих волн, а также акустической добротности. В процессе нагружений регистрировалась активность акустической эмиссии. Испытания при постоянной максимальной нагрузке в сериях соответствовали режиму многоциклового усталости. Увеличение нагрузки от серии к серии позволило подобрать режим малоциклового усталости при значительной пластической составляющей. Проанализированы изменения скоростей упругих волн, добротности, параметра поврежденности по Ю. Н. Работнову в зависимости от количества циклов нагружения.

Осуществлен прогноз времени жизни образца в зависимости от нагрузки, рассчитаны параметры регрессионных зависимостей, позволяющих оценить прочность и поврежденность пород по измеренным акустическим информативным параметрам. Показано, что в режиме многоциклового усталости прочность образцов выше при одноосном нагружении, чем при двухосном, а в режиме малоциклового усталости наблюдается обратная закономерность. Данная публикация продолжает ряд работ авторов по неразрушающей оценке прочности по акустическим свойствам [1]. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-05-00570.

ЛИТЕРАТУРА

1. Voznesenskii, A.S., Krasilov, M.N., Kutkin, Y.O., Tavostin, M.N., Osipov, Y.V. Features of interrelations between acoustic quality factor and strength of rock salt during fatigue cyclic loadings//International Journal of Fatigue. 2017– 97.P.70–78, DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2016.12.027.

О ФРАКТАЛЬНОЙ САМООРГАНИЗАЦИИ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ РАЗРУШЕНИИ МАТЕРИАЛОВ

Гиляров В.Л., Дамаскинская Е.Е., Корсуков В.Е.
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург

В настоящем сообщении обсуждаются такие аспекты фрактальной самоорганизации, как изменение параметров мультифрактального спектра и поведение числовых характеристик рекуррентных графиков (RQA) во временных рядах акустической эмиссии при разрушении материалов, сейсмических временных рядах, а также трансформаций во времени профилей латеральной поверхности металлов и аморфных стекол при их механическом нагружении.

Известно, что сильным землетрясениям и горным ударам предшествуют уменьшение фрактальной размерности (увеличение коэффициента Херста), а также уменьшение ширины спектра сингулярностей сейсмических временных рядов и увеличение детерминированности процесса по данным RQA. Такие же эффекты были отмечены во временных рядах акустической эмиссии при формировании магистральной трещины в лабораторных образцах.

Отмечено, что мультифрактальные спектры сингулярностей поверхностных профилей металлов и аморфных сплавов, измеренные методами зондовой микроскопии, трансформируются в процессе механического нагружения и сужаются перед разрушением материала.

Поскольку подобные закономерности наблюдаются в явлениях различной природы (климатологии, биомедицине, экономике), разумно предположить, что их общность связана не с деталями взаимодействий в конкретных системах, а с коллективизацией процессов, например, синхронизацией нейронной активности при эпилепсии и коллективным поведением структуры дефектов в физике прочности перед разрушением. Во всех случаях характер процесса изменяется от более сложного к более простому.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-05-00248.

ЭВОЛЮЦИЯ ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ И ОЦЕНКА СТЕПЕНИ КРИТИЧНОСТИ СОСТОЯНИЯ ДЕФОРМИРОВАННОЙ ГОРНОЙ ПОРОДЫ

¹Дамаскинская Е.Е., ¹Гиляров В.Л., ²Пантелеев И.А., ³Корост Д.В., ¹Фролов Д.И.

¹*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург*

²*Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь*

³*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва*

Целью работы является поиск признаков, позволяющих оценить состояния горной породы, находящейся в условиях механического воздействия: неопасное - появление новых дефектов не приводит к потере прочности материала; опасное - сформировалась дефектная структура, развитие которой неизбежно приведет к катастрофическому разрушению. Для решения поставленной задачи был применен подход, основанный на концепции самоорганизованной критичности.

Проведена серия экспериментов по деформированию образцов горных пород (гранит, песчаник). Впервые на каждом этапе деформирования одного и того же образца используются два независимых неразрушающих метода - акустическая эмиссия (АЕ) и рентгеновская компьютерная микротомография (СТ). Это позволяет проследить эволюцию дефектной структуры и сопоставить ее с параметрами сигналов АЕ. Получены трехмерные изображения внутренней структуры образцов (с разрешением ~3 мкм). Обнаружено, что распределение сигналов АЕ по энергии не всегда подчиняется закону Гуттенберга-Рихтера. Установлено, что тип функции распределения сигналов АЕ по

энергии может использоваться как индикатор состояния деформированного материала в выделенных пространственных областях. Экспоненциальная функция указывает на некритическое состояние; степенная функция указывает на то, что процесс накопления повреждений перешел на «опасную» стадию.

Проведено исследование особенностей формирования магистральной трещины в образцах гранита Westerly при квазистатическом одноосном сжатии без бокового подпора. В данных экспериментах, несмотря на локализованный (в пространстве) характер накопления дефектов, выявленный методом рентгеновской микротомографии, анализ энергетических распределений сигналов АЕ позволил выделить принципиально различные стадии развития магистральной трещины. Это свидетельствует об универсальности используемого подхода и найденных закономерностей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-05-00248.

СТРОЕНИЕ ОЧАГОВОЙ ЗОНЫ КАТАВ-ИВАНОВСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 4 СЕНТЯБРЯ 2018 ГОДА ПО ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

¹Дягилев Р.А., ²Варлашова Ю.В., ²Верхоланцев А.В.,
¹Верхоланцев Ф.Г., ²Гусева Н.С., ²Шулаков Д.Ю.
¹ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск
²Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Катав-Ивановское землетрясение, произошедшее 4 сентября 2018 г. в 22:58:19 (по Гринвичу) на Южном Урале, зарегистрировано сотнями станций по всему миру и по факту стало самым сильным инструментально зафиксированным землетрясением на Урале (m_b 5.4) и самым ощутимым на территории России в 2018 году ($I_0 = 6$ баллов).

Изначально координаты эпицентра всеми агентствами (ФИЦ ЕГС РАН, USGS, EMSC) были рассчитаны по данным сети телесейсмических станций и указывают на положение очага в районе г. Катав-Ивановска Челябинской области с ошибкой 7-9 км. Последующее привлечение данных региональных станций «ГИ УрО РАН» и Отдела геоэкологии ОНЦ УрО РАН не привело к существенному улучшению результатов определения местоположения очага, поскольку расстояние до ближайших сейсмических станций, расположенных в Свердловской области и Республике Башкортостан, составляет 150-180 км.

Очаг землетрясения в г. Катав-Ивановск вызвал самые сильные сотрясения (6 баллов). Зона 5-балльных сотрясений охватила Усть-Катав, Юрюзань, Сим. 4-балльные сотрясения достигли Аши, Миньяра, Бакала, Сатки. Зона 3-балльных колебаний распространилась до Уфы, Белорецка, Златоуста, Миасса. Собранные макросейсмические данные позволили определить макросейсмический эпицентр и получить глубину очага на уровне 20 ± 10 км, что является очень грубой оценкой.

Землетрясение сопровождалось значительным количеством афтершоков, что является первым известным случаем на Урале. Поэтому развертывание в первые дни после главного толчка локальной сети станций в эпицентральной зоне позволило четко их зафиксировать и судить о положении очаговой зоны более определенно. По данным локальной сети облако афтершоков компактно расположилось в 4-7 км к западу от г. Катав-Ивановск, что существенно расходится с данными о положении очага почти всех агентств. Используя точные координаты (ошибка локации составляет первые сотни метров) одного из сильных афтершоков, зарегистрированного локальной сетью, авторами были выполнены расчеты, позволившие уточнить положение эпицентра главного события и нескольких первых афтершоков методом относительной локации с привлечением данных региональных и телесейсмических станций. Уточненные координаты первых событий, когда локальной сети еще не существовало, хорошо согласуются положением облака афтершоков.

Относительная локация, опираясь на данные дальних станций, не позволяет надежно определять глубину событий в эпицентральной зоне. Модельная ошибка по глубине составляет около 5 км, тогда как в плане ошибка не превышает первых сотен метров. Для сокращения неопределенности по глубине был применен способ уточнения глубин, базирующийся на расчете функции согласования фазовых спектров первых вступлений (Епифанский и др., 2018, Дягилев и др., 2019). Применение данного метода позволило получить глубину главного очага на уровне 5.9 ± 1 км, что согласуется с глубинами зарегистрированных афтершоков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Епифанский А.Г., Габсатарова И.П., Муромцева Л.К., Картавенко Д.В., Бабкова Е.А. Применение метода «согласования спектральных фаз» для исследования глубины Алтайского (Чуйского) землетрясения 27.09.2003 г. // Результаты комплексного изучения сильнейшего Алтайского (Чуйского) землетрясения 2003 г., его место в ряду важнейших сейсмических событий XXI века на территории России: материалы XXI Науч-

но-практической Щукинской конференции с международным участием (г. Москва, 1-4 октября 2018 г.) / Ред. Е.А. Рогожин, Л.И. Надежка. – М.: ИФЗ РАН, 2018. – С. 142-147.

2. Дягилев Р.А., Габсатарова И.П., Епифанский А.Г. Параметры очага Катав-Ивановского землетрясения 4 сентября 2018 г. по инструментальным и макросейсмическим данным // Триггерные эффекты в геосистемах. М.: ИДГ РАН, 2019. С.66-67.

ОБОСНОВАНИЕ КРИТИЧЕСКИХ СКОРОСТЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕЖДУКАМЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ В УСЛОВИЯХ ВКМКС

Евсеев А.В., Ударцев А.А.
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Одной из важных задач обеспечения безопасности при разработке месторождений водорастворимых руд является контроль устойчивости элементов системы разработки. В большинстве случаев это решается путем геодезических измерений по профильным линиям на поверхности и визуального обследования выработанного пространства в шахте. Вместе с тем, в ряде случаев требуется получение количественной оценки интенсивности протекающих процессов путем проведения инструментальных измерений деформаций в выработках.

В результате многолетних исследований деформационных процессов в окрестности очистных камер предложена аппаратура и методика контроля устойчивости межкамерных целиков. Определение степени устойчивости элементов системы разработки осуществляется на основе измерения горизонтальной конвергенции выработок и поперечного расслоения целиков. Вместе с тем, критические значения контролируемых параметров, при которых начинается интенсивное деформирование целиков, определены не были. Это связано главным образом с отсутствием экспериментальных участков с требуемыми для проведения исследования условиями.

Для обоснования критических скоростей деформирования межкамерных целиков использовался комплексный подход, включающий натурные измерения, лабораторные испытания и математическое моделирование. На первом этапе исследования определена скорость ползучести образцов соляных пород в зависимости от прилагаемой нагрузки. Затем установлена зависимость между продольной и поперечной деформацией при испытании образцов и по результатам натурных измерений. На основе полученного соотношения между продольными и поперечными деформациями определена

скорость поперечного деформирования при различных уровнях нагружения. На последнем этапе методами математического моделирования определена скорость поперечного деформирования междокамерных целиков для условий экспериментального участка, при достижении которой происходит резкое снижение несущей способности целиков и переход их в стадию прогрессирующий ползучести.

Полученные результаты позволяют оценивать степень устойчивости междокамерных целиков. Дальнейшие исследования будут направлены на уточнение полученных зависимостей в различных горнотехнических условиях.

МОНИТОРИНГ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ ХИБИНСКОГО МАССИВА

Жукова С.А., Козырев А.А.

Горный институт Кольского научного центра РАН, г. Апатиты

В последние десятилетия актуальной проблемой в крупных горнодобывающих регионах является так называемая наведенная (техногенная) сейсмичность, проявляющаяся в виде толчков, горных ударов, а иногда и землетрясений. Такие динамические проявления горного давления значительно снижают безопасность горных работ и приводят к существенным материальным потерям, что стало реальностью на апатитовых рудниках Хибинского массива.

КФ АО «Апатит» ведет отработку месторождений центральной части Хибин уже на протяжении 90 лет. В связи с этим из-за интенсификации подземных и открытых работ происходит постоянное усложнение горнотехнических условий ведения горных работ на месторождениях Кукисвумчоррское, Юкспорское, Апатитовый Цирк и Плато Расвумчорр, так как происходит рост уровня действующих напряжений с сопутствующим увеличением динамических проявлений горного давления.

С 1987 г. на КФ АО «Апатит» осуществляется диагностика состояния массива горных пород, основанная на непрерывной регистрации сейсмичности. По результатам проведения микросейсмического мониторинга на подземных рудниках с 1989 г. по 2018 г. зарегистрировано 27 геодинамических явлений с магнитудой до 4.5, ощущаемых на земной поверхности.

Анализ сейсмических событий с энергией от 10^6 Дж и более за 16-летний период, показал, что максимальные значения по количеству событий относятся к периодам афтершоковой активности после проведения взрывных работ, к весенне-осенним сезонам активизации сейсмичности в пределах отрабатываемых месторождений, обусловленной

повышенной обводненностью пород, заполняющих тектонические нарушения. По месторасположению гипоцентра большая часть событий зафиксирована вблизи крупных активных разломов, границ очистных работ и в зоне влияния консоли налегающих пород, что связано с перераспределением напряжений в массиве. Чтобы снизить негативные последствия проявления техногенной сейсмичности и обеспечить безопасность проводимых горных работ на подземных рудниках КФ АО «Апатит» выполняются профилактические мероприятия, основанные на практике ведения горных работ в сложных геодинамических условиях в виде регламентов на отработку запасов глубоких горизонтов и соответствующего мониторинга состояния массива горных пород.

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ АФТЕРШОКОВ

¹Завьялов А.Д., ^{1,2}Зотов О.Д.

¹*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва*

²*Геофизическая обсерватория «Борок», пос. Борок, Ярославская обл.*

Афтершоки представляют собой яркий пример результата триггерного воздействия на литосферу. При этом в качестве явного триггера выступает главный толчок, запускающий процесс разрядки накопленных тектонических напряжений в локальной области очага, а афтершоки являются элементарными актами этого процесса. Мы исходим из концепции нестационарности горных пород в очаговой области, являющейся ее важнейшим свойством.

Представляемый доклад посвящен результатам изучения особенностей реакции нелинейной динамической системы – очаговой зоны – на триггерное воздействие – главный толчок, и подбору эмпирических формул, описывающих пространственно-временную эволюцию афтершоков. Используются данные мирового каталога землетрясений USGS/NEIC с 1973 по 2014 годы (<https://www.usgs.gov>).

В работе проведен анализ обобщенных (кумулятивных) пространственных распределений афтершоковых последовательностей, полученных при изучении большого числа главных толчков, в зависимости от магнитуды главного удара. Полученные пространственные распределения по своей форме напоминают закон Омори. Предложены эмпирические формулы, описывающие эти зависимости.

Предложен новый способ определения размера очаговой зоны по положению максимума числа афтершоков в пространстве, зависящем от магнитуды главного толчка и не зависящем от времени после главного толчка, т.е. являющейся стабильной про-

странственной характеристикой очага. Полученное на его основе корреляционное соотношение между характерным размером очаговой зоны и магнитудой главного толчка в виде $L_g L[\text{км}] = 0.425 * M - 1.57$, хорошо согласуется с аналогичными соотношениями Ю.В. Ризниченко (1976) $L_g L[\text{км}] = 0.440 * M - 1.289$ и Wells&Coppersmith (1994) $L_g L[\text{км}] = 0.671 * M - 2.939$.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проекта РФФИ 18-05-00096, а также программ государственных заданий Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

НЕКОТОРЫЕ СООБРАЖЕНИЯ В ПОЛЬЗУ ТЕПЛОВОГО МЕХАНИЗМА ЭЛЕКТРОВВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ОБРАЗЦА В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С ОДНООСНЫМ СЖАТИЕМ

Зейгарник В.А., Ключкин В.Н., Окунев В.И.
Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва

Представлены результаты исследования поведения образцов искусственного песчаника и динамики трещинообразования в них при воздействии импульсами электрического тока в условиях одноосного сжатия. Эксперименты проводились на рычажном прессе, позволяющем реализовать как режим медленного нагружения, так и квазистатического состояния. Образцы были пропитаны 1% раствором поваренной соли для обеспечения достаточной проводимости. В большинстве случаев было отмечено влияние электрического воздействия на поток и интенсивность акустической эмиссии как собственно на этапе электровоздействия, так и непосредственно за ним (эффект последствия). Было замечено, что при электрическом воздействии надежно фиксировалось изменение хода кривых таких измеряемых параметров, как усилие нагрузки, поперечное и продольное смещение (размеры образца). Эти изменения коррелировали с температурой поверхности образца, изменяющейся за счет прохождения электрического тока. Был сделан вывод в пользу уже высказанного в литературе [1] суждения о тепловой природе наблюдаемого поведения акустических сигналов и других измеряемых параметров.

Это дало основание поставить эксперименты на идентичных образцах с целью довести образец, находящийся в околокритическом состоянии (то есть в состоянии, близком к потере механической устойчивости), до разрушения непосредственно воздействием электрического тока. Эксперименты были проведены на трех образцах.

Полученные данные об усилении акустической эмиссии при нагрузках, близких к разрушению, в результате воздействия электрическим током свидетельствуют об интенсификации процесса трещинообразования с переходом его в стадию лавинного трещинообразования и последующего разрушения образца. Согласно экспериментальным данным показатели количества энергии, подводимой к образцу в каждом цикле нагружения за счет электровоздействия, с одной стороны, и за счет механического сжатия («пригрузки»), с другой, которые могут быть затрачены на трещинообразование, близки по величине. Это ставит под вопрос предположение о триггерном механизме разрушения образца за счет воздействия электрическим током в описанных экспериментах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лапшин В.Б., Патонин А.В., Пономарев А.В., Потанина М.Г., Смирнов В.Б., Строганова С.М. Инициация акустической эмиссии в обводненных образцах песчаника // ДАН. 2016. Т.469. № 1. С.97-101. – Doi: 10.7868/S0869565216190191.

МНОГОФАКТОРНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА СЕЙСМИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ В КАЛИЙНЫХ РУДНИКАХ

Злобина Т.В., Дягилев Р.А.
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Верхнекамское месторождение калийных солей (ВКМКС) является крупнейшим месторождением солей в Российской Федерации. Несмотря на то, что рудники ВКМКС не являются удароопасными, они, как и другие горнодобывающие объекты, подвержены интенсивным деформационным процессам, иногда имеющим катастрофические последствия. Многолетний опыт сейсмологических наблюдений на ВКМКС (с 1995 г.) позволяет привлечь достаточное количество исходных данных, чтобы увязать в рамках модели сейсмическую активность с разными аспектами разработки. Для таких факторов, как возраст горных выработок, наличие, возраст и тип закладочного материала, количество отработанных пластов, были найдены параметры модели для рудников СКРУ-1 и СКРУ-2 [1]. Для многофакторного анализа создан ГИС-проект, включающий в себя общегеографические данные, границы рудников, конфигурацию сейсмической сети, каталог зарегистрированных сейсмических событий, данные по горнотехническим параметрам отработки месторождения, а также дополнительную информацию по геолого-тектоническому строению ВКМКС. Для пространственного анализа в качестве пара-

метра, характеризующего сейсмичность, использованы растры плотности выделения сейсмической энергии. Также для пространственного и статистического анализа исходных данных на базе программного продукта ArcGIS использованы инструменты: зональная статистика (вычисляет статистику для каждой зоны, определенной набором данных зоны на основе значений из другого набора данных), фокальная статистика (выполняет статистические операции в определенной окрестности) и статистика набора каналов (вычисляет статистику для многомерного анализа набора каналов растра). Выполненный многофакторный ретроспективный анализ показал, что выбранная модель адекватно отражает сейсмичность на исследуемой территории. Подобие прогнозных и фактических карт выражается в совпадении основных зон сейсмического энерговыделения на большей части шахтного поля и в значениях коэффициента корреляции растров, рассчитанных для одних и тех же временных интервалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Злобина Т.В., Дягилев Р.А. Применение модели влияния горнотехнических параметров отработки при прогнозе сейсмической активности в калийных рудниках // Геофизика, №5, 2018. С.12-17.

ПРОГНОЗ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ РАЗРУШЕНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В МИРЕ НА 2020-2030 ГОДЫ

Зубков А.В., Сентябов С.В., Селин К.В.
Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург

В результате многолетних геологических, геомеханических и астрофизических исследований установлено периодическое расширение и сжатие звезд в нашей Галактике, Солнца и Земли. Наиболее информативно это явление можно наблюдать на Земле на протяжении миллионов лет. За последние 28 лет определено изменение относительной деформации и напряженного состояния земной коры на горных предприятиях в различных странах мира. На подземных рудниках Урала определено и доказано, что это влияние астрофизических процессов в космосе, а относительная деформация $\varepsilon_{\text{АФ}}$ численно одинакова для других регионов Земли. Определение природного напряженного состояния массива горных пород производим на основании нового физического закона, согласно которому природное напряженное состояние Земной коры формируется в результате наложения полей напряжений, обусловленных гравитационными γH и текто-

ническими силами Земли σ_{im} , а также астрофизическими силами $\sigma_{АФ}$, вызванными физическими процессами в космосе, и оно представлено нормальными компонентами тензора напряжений:

$$\sigma_Z^{\Pi} = -\gamma H + \sigma_{zm} + \sigma_{АФ} \quad (1)$$

$$\sigma_X^{\Pi} = -\lambda\gamma H + \sigma_{xm} + \sigma_{АФ} \quad (2)$$

$$\sigma_Y^{\Pi} = -\lambda\gamma H + \sigma_{ym} + \sigma_{АФ}, \quad (3)$$

Таблица 1. Величины напряжений в приконтурной части горных выработок

Кол-во горизонтов измерений	Регион	Напряжения в массиве, МПа			Напряжения в горных выработках, МПа
		$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_3^{\Pi} + \sigma_1^{\Pi}}{2}$;	σ_{cp} при H=500м	$\sigma = \sigma_{cp} \cdot 1,17 + \sigma_{АФ}$ При $\sigma_{АФ} = -10$ (в 2010г); $\sigma_{АФ} = -30$ (в 2030г)	$\sigma_{\theta} = \sigma \cdot 6,3$
58	Урал	-(16,0+0,03Н)	-31	-36/-56	-227/-353
16	Скандинавия	-(17,3+0,3Н)	-32	-37/-57	-233/-359
13	Канада	-(12,0+0,035Н)	-29	-34/-54	-214/-340
10	США	-(5,0+0,022Н)	-26	-29/-49	-120/-308
12	ЮжнаяАфрика	-(0,0+0,024Н)	-14	-16/-36	-101/-227
20	Китай	-(6,0+0,026Н)	-19	-22/-42	-101/-265
26	Австралия	-(8,0+0,024Н)	-20	-23/-43	-145/-271
32	Япония	-(16,0+0,026Н)	-29	-34/-54	-214/-340

Анализ величин напряжений в конструктивных элементах систем разработки и расположенных в них выработках показывает, что к 2020-2030 гг. доступ к полезным ископаемым по этим выработкам на глубине более 500 м будет чрезвычайно затруднен или даже невозможен, так как при прочности пород 100-200 МПа формирующиеся в их приконтурной части напряжения достигают 227-359 МПа, а на глубине 1000 метров составит 300-470 Мпа.

ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ИСКУССТВЕННЫХ УДЕРЖИВАЮЩИХ И ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ И МЕРОПРИЯТИЙ МЕТОДАМИ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ

Исаев Ю.С. , Дорохин К.А.
ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс», г. Санкт-Петербург

Перспективы развития мегаполисов в настоящее время все больше связаны с освоением подземного пространства для устройства транспортных коммуникаций, подземных паркингов, торговых зон и т. д. При реализации подобных проектов существен-

но возрастает риск возникновения аварий и повреждения существующей застройки в зонах влияния строительных работ. Снижение риска возникновения аварий при строительстве подземных сооружений в городской черте возможно только при условии выявления неблагоприятных факторов, оказывающих негативное влияние на существующую застройку или возводимый объект, и разработки мероприятий, минимизирующих это негативное влияние. К таким мероприятиям можно отнести возведение различных видов ограждающих и противодиффузионных подземных конструкций типа «стена в грунте», работы по инъекционному укреплению (улучшению природных свойств) вмещающего массива.

Перечисленные выше мероприятия при большом количестве достоинств имеют и один важный недостаток, к которому относится невозможность прогнозирования характеристик, объемов, прочности и водонепроницаемости как тела возведенной «стены в грунте», так и среды искусственно укрепленных грунтов. По этой причине важно производить контроль качества возведения искусственных удерживающих и противодиффузионных подземных сооружений и мероприятий. Преимущество применения сейсмоакустических методов для решения данных задач объясняется, прежде всего, экономической эффективностью, мобильностью, скоростью выполнения и наличием высоких корреляционных связей между скоростью распространения сейсмических волн и физико-механическими свойствами материала исследуемой среды. При этом применение сейсмоакустической томографии существенно повышает разрешающую способность исследований. Плотное многоазимутальное покрытие исследуемой среды сейсмическими лучами существенно повышает детальность и разрешающую способность исследований сложно построенных, малоконтрастных сред.

Существующие методики, например, межскважинное сейсмоакустическое просвечивание (МСП), позволяют исследовать практически любые глубины (соизмеримо с глубиной подготовленных скважин) даже в стесненных городских условиях.

В работе представлены результаты опыта применения метода МСП для решения задач по оценке качества возведения искусственных удерживающих и противодиффузионных подземных сооружений и мероприятий при строительстве объектов метрополитена в г. Санкт-Петербурге.

ВЫДЕЛЕНИЕ СТАДИЙ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПО ДАННЫМ О СТАТИСТИКЕ ИМПУЛЬСОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Казначеев П.А., Майбук З.-Ю.Я., Пономарев А.В.
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

Несмотря на то, что термическое разрушение (ТР) активно изучается на протяжении последних 40-50 лет, задача анализа развития процесса ТР остается актуальной (см., например, [1]). Проблемой является, во-первых, качественное отличие самого процесса ТР от значительно лучше изученного процесса механического разрушения (отсутствует магистральный разрыв и др.). Во-вторых, при исследовании ТР приходится использовать другие методы, накладывающие некоторые ограничения на возможность получения информации (например, практически невозможна локация событий разрушения).

В настоящей работе проведен анализ статистики импульсов акустической эмиссии (АЭ), связанных с ТР, с целью выделения характерных этапов. С помощью ранее разработанной установки и методики [2] получены данные о параметрах импульсов АЭ, возникающих в ходе нагрева и охлаждения образцов различных горных пород (граниты, мраморы, песчаники) до высоких температур (максимально 750°C). Важной особенностью работы является применение оценки статистических параметров потока импульсов АЭ с учетом затухания и возможностью выделения различных механизмов генерации АЭ [3]. По полученным данным надежно выявляется различие в механизмах разрушения при первичном и повторных нагревах. Также имеются основания полагать о различии процессов разрушения вследствие развития общей микротрещиноватости и микротрещиноватости, связанной с полиморфным переходом в кварце.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sun Q., Zhang W., Xue L., Zhang Z., & Su T. Thermal damage pattern and thresholds of granite // *Environmental Earth Sciences*, 2015, vol. 74, no 3, pp. 2341–2349. DOI: 10.1007/s12665-015-4234-9.
2. Казначеев П.А., Майбук З.-Ю.Я., Пономарев А.В. Оборудование и методика исследования термоакустоэмиссионных эффектов памяти в горных породах // *Сейсмические приборы*. 2019. Т. 55, № 1. С. 29–45. DOI: 10.21455/si2019.1-2.
3. Казначеев П.А., Майбук З.-Ю.Я., Пономарев А.В., Смирнов В.Б., Бондаренко Н.Б. К вопросу об анализе статистики событий акустической эмиссии по данным оди-

ночного датчика в экспериментах с термическим разрушением горных пород // Геофизические исследования. 2019. Т. 20, № 1. С. 52-64. DOI: 10.21455/gr2019.1-5.

ДИНАМИКА ФОРШОКОВ И АФТЕРШОКОВ МУРГАБСКОГО (САРЕЗСКОГО) ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ С $M=7.2$ 2015 Г. В ТАДЖИКИСТАНЕ

Каримов Ф.Х.

*Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии
Академии наук Республики Таджикистан, г. Душанбе, Таджикистан*

7 декабря 2015 г. в районе Центрального Памира, на территории Таджикистана произошло сильное коровое землетрясение с $M=7.2$ – самое сильное в этом районе после катастрофического Сарезского землетрясения 18.02.1911 г. с $M=7.4$ [1,2]. В течение 2015 г., до главного землетрясения 7 декабря, произошло пять землетрясений с M 4 и выше [1]. Первые четыре события, с промежуточными глубинами очагов от 110 до 140 км, последнее - 27 ноября, было коровым форшоком с глубиной гипоцентра 10 км: произошло «всплывание» очагов.

Очаги всех десяти афтершоков до февраля-марта 2016 г. были в основном коровыми и лишь после этого гипоцентры погрузились на промежуточные глубины около 100-130 км. Самый сильный первый афтершок, с $M=5.3$, произошёл в 10:04:57, т.е. спустя 2 ч 15 м после главного землетрясения. Это несколько отличается от значения 3 ч, которое было отмечено для афтершоков некоторых других географических районов [3]. По-видимому, возникновение некоторых афтершоков Мургабского (Сарезского) землетрясения можно объяснить действием стоячих деформационных волн в очаговой зоне главного землетрясения, образуемой при отражении этих волн от границ зоны афтершоков, в узлах которых создаются наибольшие механические напряжения. Средние линейные размеры очаговой зоны составляют 50 км в соответствии с зависимостями работы [4], откуда следует, что скорость деформационных волн для этого случая составляет 10 км/ч по порядку величины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каталог Геофизической службы РАН, URL: www.gsras.ru, Обнинск, РФ.
2. Каримов Ф.Х., Саломов Н.Г., Старков В.И., Старкова Э.Я., Шозиёв Ш.П. Сейсмогеофизические исследования на территории Таджикистана и проблемы прогнозирования землетрясений. ГеоРиск, №1, 2017, с. 20-28.

3. Завьялов А.Д. О возможном эффекте кругосветных поверхностных сейсмических волн в динамике повторных толчков сильных землетрясений. Физика Земли, вып. №1, 2018, с. 187-201.
4. Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент. В кн.: Исследования по физике очага землетрясений. М.: «Наука», 1976, с. 9-27.

ИЗУЧЕНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОН ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ ПОРОД ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ВОССТАЮЩЕГО В ПЕРЕНАПРЯЖЕННОМ ПОРОДНОМ МАССИВЕ

Корчак П.А.
СППГУ, Кировский филиал АО “Апатит”, г. Кировск

Строительство горных выработок в перенапряженных породных массивах может сопровождаться возникновением негативных геомеханических и геодинамических процессов, которые проявляются в виде динамического разрушения массива и сопровождаются квазистатическим выдавливанием или выбросом пород в выработанное пространство, что создает значительные трудности при разработке месторождений полезных ископаемых. Как отмечают многие исследователи, например, в работах [1, 2], вероятность динамического разрушения практически монолитной породы в приконтурной зоне тем выше, чем меньше степень искусственного нарушения породы в результате ведения проходческих работ. То есть, применение механизированного способа (комбайн, щитовой комплекс) при строительстве горных выработок в таких условиях повышает вероятность возникновения геодинамических процессов.

На рудниках КФ АО “Апатит” осуществляется проходка восстающих бурением на полное сечение. Гладкий контур породного обнажения, перенапряженный породный массив и тектоническое поле напряженного состояния определяют возможность возникновения динамического хрупкого разрушения породы, в том числе и горного удара. Опыт ведения горных работ на рудниках позволил сформировать представление о развитии геомеханических и геодинамических процессов при строительстве горных выработок с применением буровзрывного способа. Настоящая работа является продолжением теоретических и экспериментальных исследований, выполненных ранее. Разработанная и апробированная методика расчета зон хрупкого разрушения в перенапряженных породных массивах [3] адаптирована для условий проходки восстающих бурением. Основное внимание в работе уделено вопросам формирования зон хрупкого раз-

рушения на контуре вертикальных горных выработок кругового очертания, представлена модель разрушения хрупких пород, разработаны теоретические положения расчета зон хрупкого разрушения на основании численного моделирования. Даны рекомендации по оценке последствий геодинамических процессов при строительстве восстающих. Результаты теоретических исследований подтверждены фактическими данными, полученными при выполнении натурных наблюдений на экспериментальном участке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dammyr Q. Prediction of Brittle Failure for TBM Tunnels in Anisotropic Rock: A Case Study from Northern Norway. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016, Volume 49, Issue 6, pp 2131–2153
2. Ortlepp W. D., Stacey T. R. Rockburst mechanisms in tunnels and shafts. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 9 (1): 59–65, 1998.
3. Korchak P. A. Investigation of regularities of brittle fracture formation around mine workings in overstressed rocks at the mines of Kirovsk branch of JSC «Apatit» VII International Scientific Conference “Problems of Complex Development of Georesources”. 2018.

ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ И СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ГОРНЫХ ПОРОД НА ПРОЦЕСС ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ

Кочанов А.Н.

Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г. Москва

Закономерности процесса разрушения горных пород зависят от особенностей их структуры, степени неоднородности, обусловленной в том числе и исходной поврежденностью в виде микродефектов, распределенных, как правило, неравномерно в объеме образцов. Для оценки начальной поврежденности образцов применялся ультразвуковой метод с определением скорости продольных волн. Показатель поврежденности определялся как квадрат отношения измеренной скорости C_p в данной локальной области образца к максимальной скорости $C_{p\max}$ для данного типа горной породы: $A = (C_p/C_{p\max})^2$. Исследования показали, что значения скорости продольных волн в отдельных локальных точках образца с характерным размером 25-50 см могут существенно различаться, и это распределение с течением времени с момента первоначальных измерений может видоизменяться. Для оценки структурной неоднородности образцов использовался также метод нано- и микроиндентирования, позволяющий на

разных масштабных уровнях при различной глубине внедрения индентора определять значения твердости и модуля упругости. Степень неоднородности породы количественно оценивалась по распределению значений этих показателей коэффициентом вариации.

Динамическое воздействие моделировалось взрыванием микрочарядов ВВ и приводило к образованию микро- и макротрещин. По данным ультразвуковых измерений в образцах наблюдалось уменьшение скорости продольных волн с расстоянием от источника динамического воздействия. Размер области, где имело место снижение скорости продольных волн, ее конфигурация зависят от параметра A и, например, при $A=1,0$ изменение скорости и, соответственно, развитие микротрещин не установлено. Для образцов гранита после динамического воздействия выполнен анализ их структуры методом компьютерной рентгеновской микротомографии, в результате которого зафиксированы микротрещины раскрытием $\sim 3-10$ мкм, длиной ~ 1000 мкм.

При анализе макротрещин можно отметить, что в граните как поликристаллическом материале отдельные макротрещины имели сложную извилистую форму с переменной шириной. Это свидетельствует о скачкообразном характере их развития на начальном этапе. Задержка в развитии магистральных трещин позволяет образоваться за счет объединения микродефектов, более мелких трещин независимо от расстояния от источника воздействия в объеме образца. В мраморе как однородном материале не наблюдалось множественного трещинообразования, а имело место образование отдельных трещин большей протяженности, которые визуально наблюдались на поверхности образцов и практически достигали их границ.

ОСОБЕННОСТИ СТАРТА И ОСТАНОВКИ РАЗРЫВА НА СЕЙСМОГЕННЫХ РАЗЛОМАХ

Кочарян Г.Г., Батухтин И.В., Будков А.М.
Институт динамики геосфер РАН, г. Москва

Анализ результатов выполненных в последние годы исследований характеристик магистральных разрывов сейсмогенных разломов показывает, что их свойства не однородны, а варьируются в широких пределах для одного и того же объекта. Одним из наиболее существенных новых сведений является доказательство наличия областей, выполненных материалами с разной динамикой фрикционных характеристик в процес-

се скольжения – участков разупрочнения, упрочнения и почти нейтральных по отношению к скорости и смещению. В докладе обосновывается гипотеза, что участки разупрочнения могут соответствовать зонам контакта макрошероховатостей – «asperities».

Результаты лабораторных экспериментов и численных расчетов показывают, что динамическая подвижка всегда начинается на таких участках. Между участками разупрочнения скорость распространения разрыва и скорость скольжения снижаются, вновь увеличиваясь на соседних пятнах. На участках с упрочнением резко снижается скорость нарастания сейсмического момента и величина излучаемой энергии. При наличии больших участков упрочнения, землетрясение вырождается в событие медленного скольжения либо полную остановку разрыва. Разрыв распространяется по напряженному тектоническому разлому или до участка, обладающего свойствами скоростного упрочнения, или до пересечения с другим структурным нарушением. Размеры и фрикционные характеристики «пятен разупрочнения» определяют высокочастотную часть спектра излучения, то есть параметры сильных движений в окрестности очага. Длина разрыва определяет характеристики низкочастотной части спектра излучения, а следовательно и такие параметры, как сейсмический момент и магнитуда на большом расстоянии. Предлагаемая схема иерархии “asperities” в зоне разлома, являясь слишком упрощенной, позволяет, тем не менее, в первом приближении оценить характерные размеры таких зон и плотность их расположения, исходя из блочно-иерархической модели М.А. Садовского.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 19-05-00378.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЕМКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ СКАЛЬНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД С ЦЕЛЬЮ ОЦЕНКИ ИХ УДАРООПАСНОСТИ

Кузнецов Н.Н., Козырев А.А.
Горный институт Кольского научного центра РАН, г. Апатиты

В настоящее время при интенсивной отработке месторождений в прочных высоконапряженных породах зачастую регистрируются различные динамические формы проявления горного давления. Подобные явления, как известно, могут приводить не только к материальным потерям, но и к травмированию или гибели людей. В связи с этим актуальным является проведение предварительной оценки степени удароопасности обрабатываемых месторождений.

Считается, что одним из основных факторов, обуславливающих динамические разрушения в массиве пород, является накопленная энергия и энергообмен, когда приток энергии из внешней среды превышает ее поглощение и диссипацию в ходе разрушения. Для изучения процесса энергообмена в лабораторных условиях исследуют механические и энергетические характеристики образцов пород, получаемые при нагружении их на прессе до предела и за пределом прочности. С использованием этих характеристик можно оценивать склонность горных пород к динамическим формам разрушения.

В работе представлены результаты исследований физических свойств скальных горных пород месторождений Кольского полуострова в условиях одноосного и трехосного напряженного состояния. Полученные данные позволили установить взаимосвязь между характером разрушения и величиной критической удельной энергии деформирования образцов пород при одноосном сжатии, а также определить характер изменения их удельной энергии деформирования при переходе от одноосного к трехосному напряженному состоянию.

На основании выполненных исследований предложен метод определения склонности скальных горных пород к динамическим формам разрушения по результатам анализа допредельных кривых деформирования, полученных на стандартных прессах при одноосном сжатии.

ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД АКУСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ ПРИ ИХ СТАТИЧЕСКОМ И ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ И РАЗРУШЕНИИ

Куткин Я.О., Красилов М.Н., Тютчева А.О., Насибуллин Р.Р.
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

Горные породы вокруг выработок, кроме статических нагрузок, испытывают также циклические и ударные воздействия, приводящие к значительному сокращению запаса их прочности. Цель – неразрушающая оценка прочности горных пород на основе установления взаимосвязей между ней и акустической добротностью в условиях не только квазистатических, но и динамических механических воздействий, а также сравнение этих взаимосвязей между собой. Исследования проводились на образцах мраморизованного известняка размерами 25×25×50 мм месторождения Перевальное, Респуб-

лика Дагестан. Проведено две группы испытаний сериями при квазистатической циклической нагрузке в серии в первой группе и при динамической ударной нагрузке в серии во второй группе. Перед испытаниями и между сериями производилось измерение скоростей продольной и поперечной упругих волн, а также акустической добротности. Прочностные и усталостные квазистатические испытания проводились на универсальной тестовой машине Instron 150 LX. Динамические испытания образцов горных пород осуществлялись с помощью специально сконструированной лабораторной установки на основе разрезных стержней Гопкинсона [1]. Исследованы зависимости между акустической добротностью, прочностью и количеством N циклических динамических и квазистатических воздействий. В квазистатических испытаниях увеличение N сопровождается немонотонным изменением как прочности, так и акустической добротности – сначала уменьшение, а затем возвращение к исходным величинам. Аналогичные зависимости, полученные при динамических испытаниях, демонстрируют монотонное уменьшение обеих величин. Зависимости между добротностью и прочностью, полученные при квазистатических испытаниях, аппроксимируются логарифмической функцией, а при динамических – экспоненциальной. Данная разница обусловлена различием систем трещин, образующихся при данных механических воздействиях [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Куткин Я.О., Красилов М.Н., Насибуллин Р.Р. Установка для изучения свойств горных пород при динамических воздействиях Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 12. – С. 146-152.
2. Куткин Я.О., Красилов М.Н., Насибуллин Р.Р., Тютчева А.О. Влияние статической и динамической механической нагрузки на взаимосвязь между изменениями прочности и акустической добротности образцов известняка // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № 12. – С. 127-133.

СЕЙСМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВЗРЫВОВ В КАРЬЕРЕ НА ПОДЗЕМНЫЕ ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ

Кутуев В.А., Жариков С.Н.
Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург

При одновременном ведении горных работ в карьере и подземном руднике в одной вертикальной плоскости должны соблюдаться следующие условия: оставление предохранительного целика, обеспечивающего устойчивость массива и бортов карьера;

применение систем разработки, исключающих сдвигание (разрушение) массива предохранительного целика; ограничение мощности массовых взрывов и их сейсмического воздействия на целики, потолочины и уступы бортов.

При комбинированной разработке месторождения фронт ведения горных работ в карьере располагается в направлении навстречу фронту развития подземных очистных работ. При подземных очистных работах фронт развивается в направлении от массива к карьере [1, 2].

Взрывные работы в карьере необходимо вести таким образом, чтобы скорость сейсмических колебаний пород в районе подземной выработки не превышала предельно допустимых по устойчивости значений. Для определения допустимого значения скорости сейсмических колебаний необходимо установить допустимое динамическое напряжение в массиве. Допустимый динамический предел прочности находится в соответствии с условием сейсмоустойчивости выработки:

$$[\sigma_{\text{ст}}] + [\sigma_{\text{дин}}] \leq \sigma_{\text{дин}}$$

где $[\sigma_{\text{ст}}]$ – статическое напряжение в массиве, окружающем выработку, $[\sigma_{\text{дин}}]$ – динамическое напряжение в массиве (около выработки), $\sigma_{\text{дин}}$ – допустимый динамический предел прочности около выработки.

Величины пределов прочности на растяжения для образца и массива пород существенно отличаются (в 5-10 и более раз). Достоверно оценить величину статического предела прочности массива можно только экспериментально, что невозможно на начальных стадиях проектирования. В некоторых случаях возможен приближенный расчет с учетом среднего коэффициента структурного ослабления и на основе паспорта прочности горных пород. В приближении за допустимый динамический предел прочности пород $\sigma_{\text{дин}}$ можно принимать статический предел прочности пород на растяжение $\sigma_{\text{р}}$ увеличенный на 10-30%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при взрывных работах». Утверждены Приказом Ростехнадзора от 16.12.2013 №605. – Екатеринбург: ТД «УралЮрИздат», 2018. – 244 с.
2. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых». Утверждены Приказом Ростехнадзора от 11.12.2013 №599. – Екатеринбург: ТД «УралЮрИздат», 2018. – 208 с.

ПРОГНОЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ «ОБДЕЛКА – ВМЕЩАЮЩИЙ МАССИВ» ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ АВАРИЙ

Лебедев М.О.

ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс», г. Санкт-Петербург

Выполняемая оценка технического состояния транспортных тоннелей на основании существующих инструкций и методических рекомендаций, включающая периодический визуальный и геодезический контроль, не позволяет получить достоверную оценку технического состояния несущих конструкций, а тем более его прогнозировать, в силу наличия прямых и косвенных факторов, способствующих искажению реальной оценки результатов визуальных осмотров. Отсутствует возможность контролировать напряженно-деформированное состояние (НДС) обделок и вмещающего массива.

Для контроля (НДС) системы «обделка – вмещающий массив» имеется альтернативный метод – использование контрольно-измерительной аппаратуры, размещаемой в обделках при строительстве тоннелей в составе горно-экологического мониторинга.

Самой масштабной работой в РФ по реализации горно-экологического мониторинга при строительстве транспортных тоннелей является «Олимпийская» трасса на участке Адлер – «Альпика-Сервис», на которой было построено шесть железнодорожных и три автодорожных тоннеля общей протяженностью подземных выработок около 32,5 км. В обделку всех тоннелей были установлены сотни датчиков контроля НДС обделок, датчики контроля изменения напряженного состояния вмещающего массива методом естественной электромагнитной эмиссии (ЕЭМИ), сейсмодатчики. Со всех типов датчиков информация передается в центральный диспетчерский центр по оптоволоконной связи, где в серверах геотехнического мониторинга осуществляется обработка информации и ее визуализация на отдельном АРМе.

Наиболее ценным в реализованной системе геотехнического мониторинга с точки зрения эксплуатации является возможность контроля НДС системы «обделка – вмещающий массив» вследствие воздействий природного или техногенного характера и прогноза такого состояния. Наличие такой информации позволяет оценивать и техническое состояние тоннелей, заблаговременно принимать решения о необходимости разработки противоаварийных мер.

Наблюдения в течение пяти лет с начала эксплуатации позволяют констатировать, что происходит увеличение напряжений в обделке от «горного давления». Не-

смотря на количественные показатели абсолютных величин напряжений, при которых обеспечивается работоспособное состояние обделки, качественное изменение свидетельствует о продолжении этого процесса для большинства построенных тоннелей. В отдельных случаях приращение сжимающих нормальных тангенциальных напряжений носит линейный характер.

ИЗУЧЕНИЕ ВАРИАЦИЙ РАЗЛИЧНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИИ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД И МОДЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Лементуева Р.А., Лось В.Ф., Котляр Т.Ф.
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

В настоящей работе представлены материалы анализа результатов лабораторных экспериментов, полученных при деформировании различных образцов под воздействием линейно возрастающей длительное время нагрузки. Последняя создавалась с помощью невзрывной разрушающей смеси, помещенной в обойму и прикрепленной к верхней грани образца.

В процессе экспериментов исследовались изменения электрического потенциала (ΔU), поляризуемости (η), кажущегося электрического сопротивления (ρ_k) и проводились на аппаратуре МСВП, разработанной в МГРИ, а наблюдения за электромагнитной эмиссией (ЭМИ) и акустической эмиссией (АЭ) осуществлялись на аппаратном комплексе, разработанном в ИФЗ. В процессе исследований отмечены вариации полей, показывающие их приуроченность к возникновению макротрещин. Относительно большие вариации η отмечены также в средней части экспериментов. Электромагнитное излучение

и акустическая эмиссия наблюдались в процессе всего эксперимента, но при этом максимальная интенсивность возникала при спаде потенциала и поляризуемости. Наблюдались синхронные изменения ЭМИ и АЭ, которые повторяют ход друг друга. Отмечено, что наиболее интенсивные изменения происходили в срединной части эксперимента, т.е. задолго до макроразрушения образца. Проведенные опыты свидетельствуют о сложных связях деформационных, акустических и электромагнитных процессов, протекающих в процессе подготовки макроразрушения образцов. Из многочисленных работ зарубежных и отечественных исследователей хорошо известны следующие стадии подготовки макроразрывов в неоднородных твердых телах по мере возрастания прило-

женных механических напряжений. Вначале образуются небольшие трещины отрыва, в основном на границах зерен. Затем они объединяются, формируя трещины сдвига. При дальнейшей эволюции возникают трещины более сложного строения, составленные из элементов отрыва и сдвига. В продемонстрированных в данной работе примерах показаны аномальные изменения электрических параметров и отмечены их взаимосвязь в середине опытов. По-видимому, существенную роль при этом играли трещины отрыва. Эту относительно простую ситуацию можно представить электрической эквивалентной схемой. Проведены эксперименты по долговременному нагружению образцов горных пород, позволившие сопоставить вариации различных механических и электрических характеристик по мере подготовки макроразрушения.

СТРУКТУРА ПОЛЯ УПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ МАССИВА СКАЛЬНЫХ ПОРОД ПРИ ПРОГНОЗЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В НЕДРОПОЛЬЗОВАНИИ

Липин Я.И., Криницын Р.В.

Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург

Рассмотрены составные части тензора напряжений массива скальных пород в зависимости от их пространственно-временных условий формирования в картине первоначальных напряжений и при возникновении вторичных полей при техногенной деятельности. Отмечена роль циклических астрофизических нагрузок в земной коре в режиме реального времени, их вероятные параметры в наиболее значимых вековом и солнечном наноциклах, которые выявлены при длительном геодеформационном мониторинге недр, оказывают влияние в периоды снижения солнечной активности и действуют на все объекты недропользования вплоть до геосистем.

Учтены также напряжения, возникающие в массивах пород с взаимосвязанной закарстованностью при создании в них зоны аэрации, увеличивающие горизонтальный распор в скальном массиве в 1,8 раза.

Показано, что остаточные (латентные) напряжения являются свойством пород и при хрупком разрушении массива при сжатии уменьшаются прочностные характеристики на долю, кратную отношению их при растяжении и сжатии.

Указанные выше напряжения формируются в скальных массивах недр на фоне известных, хорошо изученных и зачастую монополюсно фигурирующих в расчетах нагрузок от веса налегающих толщ пород.

Таким образом, в практике недропользования необходимо учитывать всю сумму напряжений, возникающих в массиве на протяжении всего срока эксплуатации сооружения, т.е. литостатические от веса пород с учетом бокового распора, гидростатические от распора воды в массивах пород с взаимосвязанной закарстованностью, остаточные и напряжения экзогенного характера (космогенные) от воздействия, вероятно, космических факторов, главным образом, космического излучения.

Структура поля упругих напряжений при детализации ее компонентов позволяет повысить надежность расчетного геомеханического прогноза геодинамических явлений в недрах на стадии проектирования сооружений и является основой как для краткосрочного, так и для оперативного предсказания.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ПОЛЯРИЗУЕМОСТЬ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ И РАЗРУШЕНИИ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД

Лось В.Ф., Лементуева Р.А., Котляр Т.Ф.
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

В представленной работе рассмотрены материалы, полученные в лабораторных экспериментах при деформировании образцов горных пород и моделей под воздействием линейно возрастающей длительное время механической нагрузки. Для регистрации электромагнитного магнитного излучения (ЭМИ) и акустических сигналов (АС) использовался комплекс аппаратуры, разработанный в ИФЗ РАН (Лось и др.). Для регистрации поляризуемости и заряда абсорбции применялся прибор МСВП, разработанный в МГРИ. Отличительной особенностью аппаратуры регистрации ЭМИ является возможность оценить энергию ЭМИ за определенный промежуток времени и регистрировать форму отдельного излучения. Благодаря этому удалось установить связь между электрическими процессами в зоне разрушения и параметрами ЭМИ. Прибор МСВП позволял регистрировать реактивный ток в различных зонах нагруженного образца. В результате проведенных экспериментов отмечен синхронный характер вариаций АС и ЭМИ. В наших экспериментах было установлено, что интенсивность ЭМИ и АС заметно увеличивается в периоды понижения заряда абсорбции, причем увеличивается как количество импульсов, так и их амплитуда. Начальный этап разрушения характеризуется образованием отдельных микротрещин, раскрытие которых сопровождается появлением на противоположных стенках микротрещины разноименных зарядов. Изменение геометрических размеров таких микродиполей сопровождается ЭМИ и АС. По ме-

ре роста механической нагрузки растет количество раскрытых микротрещин и суммарный заряд на их стенках. Прибор МСВП показывает увеличение электрического потенциала в зоне растяжения и рост поляризуемости. Начиная с некоторого момента времени эксперимента прекращается рост поляризуемости и происходит ее резкое падение, сопровождаемое увеличением энерговыделения ЭМИ. Вышеописанные изменения параметров говорят об объединении микротрещин в более крупномасштабные. Выяснение взаимосвязи таких физических параметров, как ЭМИ, поляризуемость, электрический потенциал и акустическая эмиссия, позволяет выдвинуть гипотезу о природе возникновения электромагнитного излучения в горной породе при изменении напряженного состояния.

СНИЖЕНИЕ РИСКОВ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МНОГОКАНАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРЕДВЕСТНИКОВ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

¹Макаров В.В., ¹Голосов А.М., ²Опанасюк Н.А.

¹*Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток*

²*Дальневосточный государственный технический университет, г. Владивосток*

Снижение риска катастрофических последствий геодинамических явлений типа горных ударов или землетрясений требует развития прогностической базы этих событий, что связано с развитием представлений о механизмах подготовки макроразрушения и его предвестников [1]. 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 и краткосрочного предвестников [2].

Выявление среднесрочных и краткосрочных предвестников геодинамических явлений требует исследований закономерностей деформирования горных пород не только в очаговой, но и в околоочаговой области подготовки макроразрушения. 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 на прогнозирование разрушения массива.

Реверсивный характер линейных деформаций в предразрушающей области нагружения является наиболее ярким проявлением деформационных аномалий в предразрушающем состоянии образцов горных пород. Формулировка околоочаговой гипотезы указанного явления требует комплексных акустических и деформационных исследований по определению положения и размера очаговой области макроразрушения. Применение комплексных методов прогноза повышает достоверность достигаемых результатов [3].

Многоканальные методы обнаружения системы надежных предвестников разрушения образцов горных пород при одноосном сжатии позволяют значительно снизить риски катастрофических последствий геодинамических явлений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Feng X.T., Hudson J. A. Rock engineering risk. – CRC Press, 2015. – 572 p.
2. Петухов И.М., Батугина И.М. Геодинамика недр.- М.: Недра, 1996, 217 с.
3. Гузев М.А., Макаров В.В. Деформирование и разрушение сильно сжатых горных пород вокруг выработок. – Владивосток: Изд-во Дальнаука, 2007. – 232 с.

АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НЕКОТОРЫХ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ ФГУП «ГОРНО-ХИМИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ» «РОСАТОМ»

¹Махмудов Х.Ф., ²Савельев В.Н., ³Медведев В.Н.

¹*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург*

²*ООО «Прадиком», г. Санкт-Петербург*

³*ФГУП «Горно-химический комбинат», г. Железногорск*

Повышение уровня безопасной эксплуатации подземных сооружений ФГУП «Горно-химический комбинат» (ФГУП «ГХК») производится системой акустико-эмиссионного (АЭ) мониторинга A-Line DDM, осуществляющей автоматизированный сбор акустических данных из массива горных пород. В работу системы включена методика контроля с прогнозом состояния горного массива и оценкой геомеханической устойчивости подземных сооружений ФГУП «ГХК».

Для корректной интерпретации результатов регистрации сигналов упругих волн из горного массива в системе A-Line DDM необходимо изучение акустических свойств горного массива и бетонной обделки. С этой целью был разработан, изготовлен и калиброван для измерения напряжений упругой волны пленочный пьезоприемник с ли-

нейной амплитудно-частотной характеристикой в диапазоне до 20 кГц. Измерения упругих волн проводились путем регистрации отклика бетонной обделки и горного массива на ударное воздействие. Ударное воздействие производилось стальным шаром массой 4.68 кг непосредственно по бетонной обделке, через стальную плиту, прикрепленную к бетонной обделке, а также по закладной, вделанной в бетонную стену. Шар подвешивался как маятник. Регистрация отклика массива производилась пьезопленочным датчиком и «шахтным» пьезодатчиком с помощью четырехканального цифрового запоминающего осциллографа типа АКИП, соединенного с ноутбуком. Шахтный датчик устанавливался на глубине 3 м в горизонтальной скважине, пробуренной перпендикулярно плоскости стенки выработки, и находился непосредственно в горном массиве. Пьезопленочный датчик устанавливался на бетонную стенку. Проведенные измерения скорости распространения упругой волны от удара шаром в слое бетона дали величину 3920 м/с. Оценка скорости волны в бетоне, произведенная с помощью расчета модуля упругости для плоской волны, составила величину 4343 м/с. По дисперсионным кривым для симметричной Лэмбовской моды S_1 и для симметричной нулевой моды S_0 было показано, что в случае действия источника упругих волн непосредственно в бетонной обделке горной выработки энергия ударного воздействия на горный массив преобразуется в распространяющиеся нормальные волны S_0 и S_1 , обусловленные упругими свойствами бетона и толщиной обделки. Контролируемый массив горных пород сложен биотитовыми гнейсами. Измерения скорости упругих волн в массиве горных пород дали величину 5318 м/с. Было проведено измерение спектрального состава отклика массива горных пород на возбуждение его ударом шара, а также оценена энергии в упругой волне, формируемой ударом шара (0,3 Дж). Спектральная плотность возбуждения массива от удара шаром концентрируется в диапазоне 0,7-3,2 кГц.

Выявление дефектов разрушения по данным АЭ работоспособных каналов и оценка размеров образующихся дефектов.

В данном разделе будет продемонстрирована возможность выделения очаговых стадий разрушения горных пород в различные суточные циклы регистрации и для разных работоспособных каналов, а значит и наличие самого факта разрушения блоков на определенном масштабном уровне. Определено значение параметра DE для каждого канала. Сделана оценка размеров образующихся дефектов.

Процедура выделения дефектов разрушения при использовании программы **SEISPREP** подробно изложена в материалах [1-2].

В процессе натурных экспериментов исследованы акустические свойства бетонной обделки и массива гетерогенных пород подземных сооружений ФГУП «ГХК» («Горно-Химический Комбинат» «Росатом» Россия, г. Железногорск, Красноярский край), в районе скважины № 5. Испытан разработанный нами датчик регистрации импульсов АЭ для установки в скважинах диаметром 76 мм. По результатам этих экспериментов от организации ФГУП «ГХК» «Росатом» получен акт (№ 212-25-60-01/2379 от 15.05.2018г.) о внедрении (использовании) результатов работы Х. Ф. Махмудова. Выявлены акустические характеристики горных выработок в наиболее типичных узлах, а также рассмотрена модель и математический аппарат для оценки и слежения за развитием процессов проявления горного давления в подземных сооружениях. Установлена возможность обнаружения момента начала формирования очага разрушения в подземных сооружениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Махмудов Х. Ф; Савельев В.Н; Савельев Д. В; Медведев В.Н; Круглов С. Ю. Сборник материалов: XXIII Петербургские чтения по проблемам прочности, посвященные 100-летию ФТИ им. А.Ф. Иоффе и 110-летию со дня рождения чл.-корр. АН СССР А.В. Степанова. Санкт-Петербург, 2018.С: 136-137.
2. Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф. // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. № 6. С. 915–923.

ВОЗМОЖНОСТИ МОНИТОРИНГА ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ ОСЕДАНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ Г. БЕРЕЗНИКИ ПО СНИМКАМ СПУТНИКА SENTINEL

¹Михайлов В.О., ¹Киселева Е.А., ²Барях А.А., ³Исаев Ю.С., ¹Смолянинова Е.И.

¹*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва*

²*Пермский Федеральный исследовательский центр УрО РАН, г. Пермь*

³*ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс», г. Санкт-Петербург*

Будут представлены результаты оценки смещений земной поверхности с использованием 15 снимков, выполненных со спутника Sentinel-1B с 20.04.2018 по 29.10.2018 гг. (35 трек, нисходящая орбита). Предварительные расчеты (построение дифференциальных интерферограмм) проводились в программном пакете SNAP, дальнейший поиск устойчивых отражателей проводился в пакете StaMPS/MTI. Цифровая

модель рельефа – ASTER2 GDEM. В результате расчетов было найдено более 100000 устойчивых отражателей на район г. Березники (рис. 1).

Средние скорости смещений в направлении визирования спутника для устойчивых отражателей в окрестности точек, обозначенных номерами 1 (в районе ул. Железнодорожная), 2 (в районе улиц Шахтерская, Кряжевая, Сосновая, Вавилина), 3 (в районе ул. Преображенского), 4 (в районе ул. Свердлова), 5 (Пионерлагерь) и 6 (в районе ул. Новожилова) составляют 157, 125, 50, 30, 77 и 55 мм/год соответственно. Эти результаты хорошо согласуются со смещениями, полученными по снимкам спутника TeraSAR-X до 2016 года.

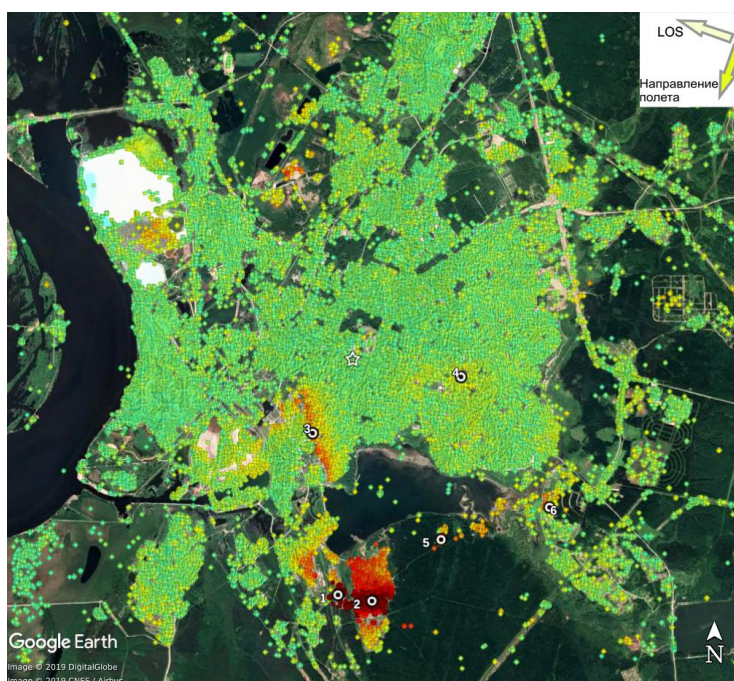


Рис.1. Средние скорости смещений в направлении визирования спутника для выделенных устойчивых отражателей, нанесенных на карту GoogleEarth. Красный цвет – скорости смещения отрицательные (от спутника), зеленый – смещения не превышают 10 мм/год. Звездочкой показана область, выбранная в качестве области отсчета (базовая точка).

ОБ ЭКСПЕРИМЕНТАХ В СЕЙСМОЛОГИИ

Мишин С.В.

Северо-Восточный комплексный институт им. Н.А. Шило ДВО РАН, г. Магадан

Наши эксперименты проводятся с регистрацией сейсмических событий в предположении, что характер сейсмического излучения остается подобным излуче-

нию при землетрясениях. В 18 веке наука об электричестве занималась в основном молниями, но важнейшие результаты были получены при экспериментах с простыми источниками.

1. При ударах разных масс, падающих с таких высот, чтобы энергия ударов была одинаковой ($m_1 \cdot h_1 = m_2 \cdot h_2$), амплитуды сейсмических сигналов оказываются пропорциональными значениям ударяющих масс. Такой же результат отмечается при ударах масс, выполняемых с помощью резины, оттягиваемой на равные расстояния.

2. При ударах разных масс, отдающих «грунту» равные количества движения ($m_1 \cdot \sqrt{2gh_1} = m_2 \cdot \sqrt{2gh_2}$), сейсмические сигналы оказываются одинаковыми. Отсюда мы делаем предположение о том, что сейсмическое излучение определяется не энергией удара, а импульсом, переданным среде при торможении масс.

3. Были получены эквивалентные сейсмограммы при взрывах навесок дымного пороха, заключенных в стальную болванку, и ударах масс, падающих на эту болванку. Сейсмограммы, близкие по амплитудам и частотному составу, соответствовали энергиям, различающимся в сотни раз (во столько же раз, во сколько массы ударяющих тел превышали массу пороха). Сейсмические сигналы при ударах и взрывах определялись переданным в среду импульсом (количеством движения).

4. Квадрантное распределение знаков первых вступлений было экспериментально получено при ударах массивных тел, перемещающихся без отрыва от «грунта». Вокруг площадки удара размещались одинаковые сейсмоприемники, сейсмическое излучение регистрировалось в нашем случае шестью каналами. При вертикальном ударе знаки первых вступлений совпадали, а при ударе массы, сдвигаемой без разрыва со средой, знаки вступлений демонстрировали квадрантное распределение. Результат опытов показал, что квадрантное распределение определяется третьим законом Ньютона, и поиски нодальных плоскостей и осей сжатия и растяжения бесперспективны.

Землетрясение – механический процесс, который описывается классической механикой, в применении квантовой механики и теории относительности нет необходимости. Поэтому результаты наших простых опытов проливают свет на сейсмические процессы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мишин С.В. О физике сейсмических процессов. Эксперименты и модели. Lanbert Academic Publishing. – 2013, 196 с.
2. Мишин С.В. Об экспериментах в сейсмологии. // Научный журнал «Содружество». №3, часть 2, 2016, с.105-109.

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Мишин С.В.

Северо-Восточный комплексный институт им. Н.А. Шило ДВО РАН, г. Магадан

Мы отказались от модели упругой отдачи из-за того, что не видим в земных недрах материалов, способных аккумулировать упругую энергию в необходимых количествах; самые мощные механизмы, работающие на принципе упругой отдачи (арбалеты), уступают по мощности небольшим обвалам горных пород. Кроме того, описание процессов по моделям упругой отдачи проводится для невесомой среды. Удар генерирует сейсмическое излучение, пропорциональное механическому импульсу, переданному среде. Как показывают результаты проведенных работ по глубинному сейсмическому зондированию, земные недра содержат полости, которые выявляются в виде отражающих площадок на разных глубинах. Напряженное состояние недр определяется в основном весом горных пород, опирающихся на блоки, располагающиеся под ними. При разрушении опорной площадки блок смещается вниз под действием своего веса. На рисунке представлена схема такого процесса.

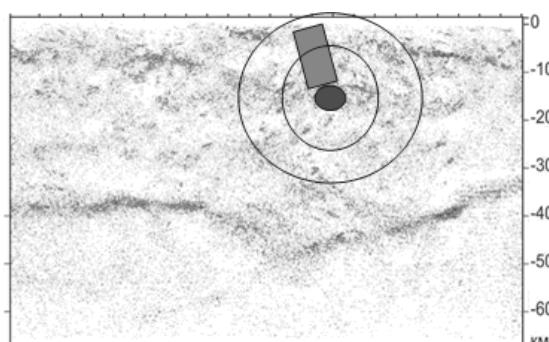


Рис.1. Схема процесса землетрясения. Сплошной кружок – очаг, здесь разрушена опорная площадка; Блок смещается, преобразуя потенциальную энергию в кинетическую. Фон – распределение отражающих площадок, полученное при работах 3ДВ

При перемещении блока потенциальная энергия Mgh переходит в кинетическую $Mv^2/2 = P^2/(2M)$. Здесь M – масса сместившегося блока, g – ускорение свободного падения, v – скорость, приобретенная блоком, P – количество движения (механический импульс тела). Механический импульс имеет две формы – поступательный (количество движения) и вращательный (момент количества движения), связанный с поворотами тела при движении. Механический импульс отдается среде при ударе, поэтому магнитуда толчка имеет размерность импульса. Импульс распространяется в среде по законам удара – при передаче импульса от возбужденных частиц к невозбужденным действует ньютоновская сила $f = dP/dt$. Распространение импульса в среде происходит в виде сейсмического излучения – поступательный импульс определяет волну P , а вра-

щательный – волну S. Фронт распространения волн – сферический, поэтому плотность импульса на поверхности фронта падает с расстоянием от очага пропорционально квадрату расстояния. На расстоянии R плотность импульса составит $G = P/(4\pi R^2)$; при передаче импульса здесь будет действовать давление $N = dG/dt$, которое определит балл сотрясения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мишин С.В. Модель обвального землетрясения. // Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности» №6, 2013 г.
2. Мишин С.В. «О моделях землетрясений» // Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности». №6, 2016.

ОСОБЕННОСТИ ЛОКАЛИЗАЦИИ ОЧАГОВ СИЛЬНЫХ КОРОВЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Морозов В. Н.
Геофизический центр РАН, г. Москва

Тектонические разломы являются определяющим фактором возникновения градиентных полей тектонических напряжений в верхней части земной коры. Используются структурно-тектонические схемы, результаты GPS-наблюдений и сейсмологические данные для моделирования напряженно-деформированного состояния эпицентральных зон сильных коровых землетрясений с $M \geq 6.0$ на территориях Индии, Турции, Японии, Ирана и США [1-5]. Установлена тенденция локализации эпицентров очагов землетрясений в зонах аномально высокой интенсивности напряжений, т.е. в зонах высокой плотности потенциальной энергии деформации. Показано, что области локализации афтершоков соответствуют областям сброшенных напряжений после образования магистрального разрыва, протяженность которого зависит от площади аномально высокой интенсивности напряжений. Результаты ретроспективного прогноза локализации очагов сильных коровых землетрясений могут быть полезны для постановки геофизических исследований с целью прогнозирования сильных землетрясений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Морозов В.Н., Маневич А.И., Моделирование напряженно-деформированного состояния эпицентрального района землетрясения 26.01.2001 г., $M=6.9$ (Индия) // Геофизические исследования. 2016. Том 17. № 4. с. 23-36. DOI: 10.21455/gr2016.4-2

Морозов В.Н., Маневич А.И. Моделирование напряженно-деформированного состояния эпицентральной зоны землетрясения 13.03.1992 ($M = 6.9$, Турция) // Геофизические исследования. 2018. Т. 19. № 1. с. 17-29. DOI: 10.21455/gr2018.1-2

2. Морозов В.Н., Маневич А.И. Моделирование напряжённо-деформированного состояния эпицентральной зоны землетрясения (Кумамото, Япония) 16 апреля 2016 г. $M 7,3$ // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2017. № 6. с. 48-54

3. Морозов В.Н., Татаринов В.Н., Колесников И.Ю., Маневич А.И. Моделирование напряженно-деформированного состояния эпицентральной зоны сильного землетрясения в Иране (26 декабря 2003 г. $M_w = 6.6$) // Физика Земли. 2018. № 4. С. 68-78. DOI: 10.1134/S0002333718040087

4. Морозов В.Н., Кафтан В.И., Татаринов В.Н., Колесников И.Ю., Маневич А.И., Мельников А.Ю. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния и результаты GPS-мониторинга эпицентральной зоны землетрясения 24 августа 2014 (г. Напа, шт. Калифорния, США) // Геотектоника. 2018. №5. с. 90-102. DOI: 10.1134/S0016853X18040069

ЭВОЛЮЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ В ХОДЕ ЛАБОРАТОРНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ЦИКЛА

Остапчук А.А., Морозова К.Г.
Институт динамики геосфер РАН, г. Москва

Тектонические напряжения, действующие на массив горных пород, непрерывно изменяются. Главной структурной особенностью массива, контролирующей закономерности накопления и релаксации напряжений, является его нарушенность. Если в массиве сформировались крупная трещина или разлом, то дальнейшие деформации будут локализоваться именно в данной зоне. Структура и вещественный состав центральной части разлома контролируют интенсивность сброса напряжений и излучательную эффективность актов проскальзывания [Kocharyan et al., 2017, GJI]. По современным представлениям именно фрикционное скольжение по уже сформированным разломам является механизмом большинства неглубоких землетрясений [Scholz, 2002; Шерман, 2014].

В настоящей работе мы на основе лабораторных экспериментов провели детальный анализ акустоэмиссионного излучения, сопровождающего деформирование модельного разлома. Подготовка динамических событий, вызванных скольжением по раз-

лему, отчетливо проявляется в закономерностях акустоэмиссионного излучения. Будет представлен новый метод анализа акустических импульсов (АИ), излучаемых в процессе скольжения разлома. Метод основан на анализе волновой формы АИ и их кластеризации по параметру волновой формы. Статистический анализ отдельных кластеров позволяет выделить разномасштабные деформационные процессы, характеризующиеся различными скейлинговыми соотношениями. Показано, что по мере приближения к моменту динамического события начинают преобладать медленные деформационные процессы, амплитуда которых монотонно увеличивается.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (проект МК-758.2018.5).

ИССЛЕДОВАНИЕ СОВРЕМЕННОЙ ГЕОДИНАМИКИ УРАЛА ПО ДАННЫМ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Панжин А.А., Панжина Н.А.
Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург

Сейсмичность Урала характеризуется большим количеством мелкофокусных событий в основном с магнитудой 2-3, однако в сентябре 2018 г. на Южном Урале произошла серия землетрясений с магнитудами 4.2-4.5. Эпицентр землетрясений находился в 7 км. северо-западнее города Катав-Ивановск на глубине 10 км.

Ранее геодинамические исследования на Урале проводились в основном геофизическими методами, постоянные деформационные измерения ведутся на единственной IGS станции ARTU. Исследования геодинамики Северного и Среднего Урала по данным GPS были выполнены под руководством В.И. Уткина (ИГФ УрО РАН) в 2009-2010 гг. При переопределении координат пунктов геодезических сетей было определено изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) массива. По результатам сделаны выводы о движении Уфимского выступа Восточно-Европейской плиты на восток, и его вклинивании в Уральскую структуру, что будет приводить к накоплению упругих напряжений, которые могут вызвать сильные землетрясения.

В дальнейшем мониторинг НДС не был организован и исследования не проводились. Однако, в Институте горного дела УрО РАН ведутся исследования региональной геодинамики с использованием исходных данных постоянно действующих GNSS станций. Производилось вычисление их координат от пунктов IGS, определение скоростей

в системе ITRF-2014, построение полей сдвижений и деформаций по разностям скоростей.

В связи с произошедшим в сентябре 2018 г. землетрясением был проведен эксперимент, в котором было задействовано девять постоянно действующих GNSS станций Южного Урала. Размеры района исследований составили 280х250 км. Была сделана выборка исходных данных за период с 15.08.2018 по 15.10.2018 г. для фиксации движений и деформаций до и после землетрясения. Программа эксперимента включала:

- определение абсолютных координат и их изменения по осям координат ежесуточно, за 61 сутки, путем привязки их от 10-12 исходных пунктов IGS в системе INRF-2014;

- обработку и уравнивание GNSS сети для исследования трендовых движений.

В результате были определены:

- суточные амплитуды изменений координат по трем осям координат, амплитудная и трендовая составляющие до землетрясения, между сериями землетрясений и после землетрясений;

- горизонтальные сдвиги и деформации массива горных пород в районе в виде перемещений на восток с амплитудами 7-10 мм;

- зафиксированы вертикальные сдвиги, которые проявляются в виде равномерного наклона: поднятия в юго-западной части, оседания на северо-востоке;

- отмечены деформации растяжения в юго-западной и западной частях участка под азимутами 135° и 45°, в восточной части преобладают сжимающие деформации.

Также построены азимут-диаграммы сдвижений по всем возможным ΔX , ΔY , ΔH , 2D, 3D между пунктами GNSS сети. Установлено соответствие, и несоответствие по основным направлениям преобладающих ориентировок разломов в Уральском регионе. Сделаны выводы о необходимости расширения GNSS сети до 25-30 пунктов за счет включения дополнительных станций по внешнему контуру.

МОДЕЛЬ НЕЛИНЕЙНОГО УПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД С ОРТОТРОПНОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТЬЮ

¹Пантелеев И.А., ²V. Lyakhovsky, ³J. Browning, ⁴P.G. Meredith, ⁵D. Healy, ⁴T.M. Mitchell

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь*

²*Geological Survey of Israel, Jerusalem, Israel*

³*Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile*

⁴*University College London, London, UK*

⁵*University of Aberdeen, Aberdeen, UK*

Деформационное поведение горных пород в условиях произвольной трехмерной конфигурации действующих нагрузок является существенно нелинейным, что связано с исходной дефектной структурой породы, обусловленной процессами ее формирования и эволюции в неоднородном поле тектонических и гравитационных сил. Смена траектории нагружения породы в естественном залегании, вызванная, например, изменением геодинамического режима деформирования массива, его подземной или открытой разработкой, приводит к интенсификации роста поврежденности, типологически и топологически отличной от поврежденности, сформировавшейся на предыдущей стадии нагружения.

В работе представлено обобщение нелинейной изотропной модели деформирования и разрушения горной породы на случай анизотропного повреждения при трехосном нагружении. Модель учитывает как анизотропию упругих свойств, так и наведенную (индуцированную) поврежденностью анизотропию, а также зависимость упругих свойств от вида напряженно-деформированного состояния. При формулировке определяющих соотношений предполагается ортотропная упругая симметрия породы, вводится тензор поврежденности второго порядка, главные значения которого описывают повреждение в трех ортогональных направлениях, связанных с ориентацией главных осей действующих напряжений.

Для калибровки и идентификации параметров разработанной модели были использованы экспериментальные результаты деформирования сухого песчаника как при традиционном ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$), так и при истинном трехосном нагружении ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$). Показано, что для обоих типов нагружения начало роста поврежденности в направлении действия σ_3 контролируется только величиной дифференциального напряжения. Численное моделирование истинного трехмерного нагружения песчаника показало, что разработанная модель анизотропной поврежденности адекватно описывает как нелинейное деформационное поведение песчаника, так и вариации скорости Р-волн в трех ортогональных направлениях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (грант № 19-77- 30008).

РЕКОНСТРУКЦИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ИХ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ ПО ДАННЫМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

¹Пантелеев И.А., ²Ребецкий Ю.Л.

¹ *Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь*

² *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва*

Настоящая работа посвящена созданию нового экспериментального метода, позволяющего оценивать параметры напряженно-деформированного состояния образцов горных пород (распределение по объему образца ориентаций главных осей тензоров напряжений и деформаций, вид эллипсоида напряжений и деформаций, относительных величин максимального касательного напряжений и давления) при их квазистатических лабораторных испытаниях по данным акустической эмиссии (АЭ). Разрабатываемый метод представляет собой объединение двух известных в сейсмологии методов: метода восстановления компонент тензора сейсмического момента и метода катакластического анализа (МКА) сейсмологических данных о механизмах очагов землетрясений. При этом если первый метод для анализа данных АЭ применялся ранее рядом научных коллективов для определения механизмов разрушения горных пород, то адаптация второго метода к данным АЭ выполнена впервые.

Для определения компонент тензора сейсмического момента отдельных событий АЭ проведена программно-аппаратная реализации комплекса алгоритмов: алгоритма определения времени вступления Р-волны, двухстадийного метода уточнения решения пространственной задачи локации на основе USBM метода, процедуры абсолютной калибровки преобразователей АЭ и последующей деконволюции волновых форм для определения абсолютной величины амплитуды Р-волн, а также трехступенчатый алгоритм определения тензора сейсмического момента и его уточнения. Компоненты тензора сейсмического момента каждого события АЭ являются исходными данными для метода МКА, первый и второй этапы которого были специально адаптированы под лабораторный масштаб.

Апробация разработанного метода проведена на акустико-эмиссионных данных, полученных при трехточечном изгибе образцов мрамора Коелга. Последовательно решены задачи определения и уточнения механизмов событий акустической эмиссии. Установлено, что преобладающее большинство механизмов относится к трещинам нормального отрыва (схлопывающимся и раскрывающимся) с различной величиной дополнительной сдвиговой составляющей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 17-05-00720-а).

МЕХАНИЗМЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ПЕСЧАНИКА ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ ДВУХОСНОМ СЖАТИИ ПО ДАННЫМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

¹Пантелеев И.А., ²Коваленко Ю.Ф., ²Шевцов Н.И.,

³Зайцев А.В., ²Карев В.И., ²Устинов К.Б.

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь*

²*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва*

³*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь*

Известно, что в неоднородном трехмерном поле действующих напряжений процесс деформирования и разрушения осадочных горных пород является существенно нелинейным, приводящим к формированию сложной структуры разрывных и сдвиговых нарушений, ориентация которых определяется как исходной структурой (текстурой) породы, так и ориентацией действующих нагрузок. Формирующаяся в таких условиях иерархия микротрещин и микросдвигов приводит к наведенной анизотропии упругих свойств и существенному изменению коллекторских свойств породы.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию механизмов разрушения образцов песчаника при неравномерном двухосном сжатии на основе анализа данных акустической эмиссии (АЭ) и является предварительным этапом более общего исследования, направленного на изучение механизмов разрушения осадочных горных пород при произвольном трехмерном (истинном) нагружении.

Испытания образцов песчаника Верхнекамского региона на двухосное сжатие с непрерывной записью акустической эмиссии проводились по трем программам: равнокомпонентное сжатие в плоскости, неравнокомпонентное сжатие в плоскости, сдвиг в плоскости. Для разделения зарегистрированных импульсов АЭ по механизмам источника решались последовательно задача кластеризации импульсов АЭ (методом k-средних) с предварительным выделением наиболее изменяющихся частотно-временных параметров и задача классификации найденных кластеров с помощью методики JCMS-III B5706.

В результате проведенного исследования установлено, что все регистрируемые в процессе деформирования песчаника импульсы АЭ можно разделить на три кластера: низко- (НЧ) и высокочастотные (ВЧ) импульсы АЭ с источником типа трещины нормального отрыва и импульсы АЭ с источником типа трещины сдвига. Показано, что в случае сдвига в плоскости на начальном этапе деформирования преобладают НЧ импульсы АЭ от трещин нормального отрыва, что связано, наряду с формированием тре-

щин отрыва, параллельных свободному от напряжений торцу, с формированием трещин отрыва ортогональных оси минимального сжатия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 17-41-590148-а).

ОСОБЕННОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ПОДВИЖКИ ПО МОДЕЛЬНОМУ РАЗЛОМУ

¹Пантелеев И.А., ²Окунев В.И., ²Новиков В.А.

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

²*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва*

Работа посвящена поиску предвестниковых изменений в непрерывной акустической эмиссии (АЭ), регистрируемой при подготовке и реализации динамической подвижки по разлому. Разломная зона моделируется с помощью модифицированной слайдер-модели, состоящей из бетонного блока, нагруженного постоянным нормальным усилием и движущегося по горизонтальному основанию из бронированного стекла под действием сдвигового усилия, приложенного через пружину известной жесткости. Между подвижным блоком и основанием располагался слой кварцевого песка толщиной не более 2 мм. Регистрация акустической эмиссии осуществлялась двумя группами датчиков, одна из которых была установлена на боковых поверхностях подвижного блока, а вторая – на неподвижном основании с разных сторон от блока.

В основе поиска предвестников лежала гипотеза о коррелированном изменении параметров акустической эмиссии (параметров мультифрактального спектра), вызванном формированием единого силового каркаса в заполнителе (кварцевом песке) размер которого растет с увеличением приложенного сдвигового усилия. Вычисление параметров мультифрактального спектра непрерывного сигнала АЭ с каждого из датчиков осуществлялось с использованием метода MF-DFA. Для оценки степени коррелированности многомерных временных рядов параметров для различных групп датчиков была использована спектральная мера когерентности, оцениваемая в бегущем временном окне трех различных размеров, 13.4, 53, 429.5 секунд.

В результате проведенного анализа показано, что наблюдение (выявление) эффекта синхронизации статистических свойств АЭ зависит как от набора параметров, для которых рассчитывается спектральная мера когерентности, так и от места регистрации исходных данных.

Установлены оптимальные параметры и наборы исходных данных для наблюдения эффекта синхронизации мультифрактальных свойств акустической эмиссии до и после динамической подвижки. Полученные результаты демонстрируют перспективность использования данного подхода для акустического мониторинга реальных активных разломов, а также необходимость дальнейших исследований обнаруженного эффекта синхронизации с целью определения влияния на него различных факторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (грант № 19-77- 30008).

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ МИКРОТРЕЩИН В ЛАБОРАТОРНЫХ ОБРАЗЦАХ ГОРНЫХ ПОРОД В ПОЛЕ РАСТЯГИВАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ

¹Панфилов Г.П., ¹Якупов Р.Р., ^{1,2}Зайцев Д.В., ¹Панфилов П.Е., ³Кочанов А.Н.

¹*Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург*

²*Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, г. Екатеринбург*

³*Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г. Москва.*

В докладе обсуждается развитие микротрещин в лабораторных малогабаритных образцах горных пород при приложении растягивающих нагрузок. В качестве модельных материалов использовали: гранит, кварцит, серпентинит, уральскую яшму, песчаник и антрацит. Нагружение образцов проводили по схеме диаметрального сжатия на воздухе и в воде (скорость 0,1 мм/мин). Образцы имели форму таблетки диаметром 6 мм и высотой 3 мм. Трещины изучали при помощи оптических микроскопов, поверхности изломов – на сканирующем электронном микроскопе. Траектория движения опасной трещины в образцах определялась геометрией приложения нагрузки. Во всех породах, за исключением яшмы, ее продвижение удавалось затормозить, остановив нагружение образца. Их мода разрушения была аттестована как хрупкое внутризеренное разрушение, тогда как у яшмы – смешанное хрупкое меж- и внутризеренное разрушение. Опасная трещина состояла из почти слившихся порообразных микротрещин, ширина которых зависела от среды испытания (в воде она была примерно в 2 раза меньше, чем на воздухе). Смена атмосферы испытания не приводила к изменению морфологии изломов. Анализ полученных результатов показывает, что на микроуровне магматические и осадочные горные породы демонстрируют вязко-упругое поведение. Влияние воды на деформационное поведение модельных материалов можно объяснить эффектом Ребиндера.

К ОЦЕНКЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ ГОРНЫХ ПОРОД, НАХОДЯЩИХСЯ В УСЛОВИЯХ ТЕКТОНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Паньков И.Л.
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

По результатам физического моделирования, приведенных в работе [1], установлено, что механизм формирования напряжения бокового распора связан с возможностью деформирования горных пород внутрь порового пространства – при всестороннем сжатии, вызывающем закрытие пор, эта возможность исчезает, что приводит к увеличению передачи вертикального напряжения в боковых направлениях. На основе выдвинутого положения предложен метод теоретической оценки напряжений бокового распора в уплотненных горных породах нетронутого массива, находящегося в условиях действия гравитационного поля напряжений [1].

Разработанный метод использован при оценке естественных полей напряжений горных пород, находящихся в условиях тектонического воздействия. В результате получена новая система физических уравнений, определяющих связь напряжений и деформаций в уплотняющихся пористых породах нетронутого массива, находящегося в условиях всестороннего сжатия [2]. Анализ полученных соотношений показал, что тектоническое воздействие на массив проявляется исключительно наличием в породе горизонтальных деформаций, обусловленных смещением плит и блоков земной коры. В этой связи, гравитационное поле напряжений можно характеризовать как состояние массива, находящегося в условиях нулевого тектонического воздействия. Тектоническое поле напряжений предлагается характеризовать как состояние массива, находящегося в условиях линейно-направленного или плоско-направленного тектонического воздействия. Получены выражения для определения максимального и минимального горизонтальных напряжений нетронутого массива, находящегося в условиях плоско-направленного тектонического воздействия, где в качестве определяющих параметров выступают пористость и модуль деформации горных пород.

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЛОКАЛЬНЫХ КРИТЕРИЕВ РАЗРУШЕНИЯ К СОЛЯНЫМ ПОРОДАМ

Паньков И.Л., Морозов И.А., Кузьминых В.С.
Горный институт УрО РАН, г. Пермь,

Устойчивое состояние подземных горных выработок определяется физико-механическими свойствами пород и напряженным состоянием приконтурной части массива. Традиционные подходы к оценке устойчивости породных обнажений основаны на сопоставлении локальных напряжений в зоне их концентрации с механическими характеристиками горных пород, которые определяются по результатам лабораторных испытаний породных образцов. В отличие от подходов линейной механики разрушения, нелокальные критерии прочности рассматривают разрушение как процесс, происходящий не в математической точке, а в некоторой ее окрестности – зоне предразрушения.

Для обоснования возможности применения нелокальных критериев разрушения к соляным породам был проведен комплекс лабораторных исследований на трехточечный изгиб призматических породных образцов, а также образцов из модельного материала (гипс) на электромеханическом прессе Zwick Z050. Испытания выполнялись по методике определения вязкости разрушения, рекомендованной Международной организацией по механике горных пород (International Society for Rock Mechanics, ISRM). Для оценки размеров зоны предразрушения была использована бесконтактная оптическая система построения полей деформаций Vic-3D.

Проведенные сопоставительные исследования деформирования соляных и модельных гипсовых образцов при трехточечном изгибе предназначены для описания процесса разрушения соляных пород в поле растягивающих напряжений с позиции нелокальных критериев прочности с учетом формирования и распространения зоны предразрушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Паньков И.Л. Физическое моделирование и теоретическая оценка бокового распора в горных породах под действием силы тяжести // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, № 5, 2016, с. 68-75.
2. Паньков И.Л. О методе теоретической оценки величины бокового распора при действии тектонических сил в массиве горных пород / Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 16 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2018. – с. 114-118. (DOI: 10.7242/gdsp/2018.16.29).

СРЕДНЕСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ГЛУБИНЫ СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ПО ДАННЫМ ПАРАМЕТРА В-VALUE ЗАКОНА ГУТТЕНБЕРГА-РИХТЕРА

Попандопуло Г.А.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

Проведены детальные исследования пространственно временных вариаций параметра b (закона Гуттенберга-Рихтера) в зависимости от глубины и латерального простирания выборок данных землетрясений в земной коре Гармского района в Таджикистане.

Исследован по площади и глубине параметр минимальной магнитуды прогнозируемого землетрясения (МПЗ), определяемый по правому краю линейной части закона Гуттенберга-Рихтера (ГР). Показано, что этот параметр является характеристикой структурных блоков земной коры и варьирует как по площади, так и по глубине.

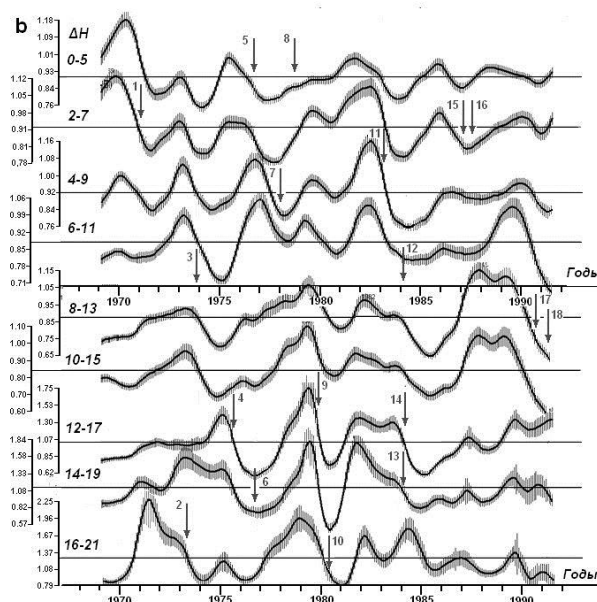


Рис. 1. Пространственно-временные вариации параметра b и моменты землетрясений

Анализ временных вариаций b по данным выборок землетрясений из семи локальных районов, расположенных вдоль и в крест простирания геотектонических структур показывает, что в 84 % случаев появление аномалий b заканчиваются «сильными» землетрясениями магнитудами $M \geq \text{МПЗ}$, а вероятность среднесрочной оценки времени возникновения сильных событий составляет 71 %. Для анализа использовалась статистика из 38 «сильных» землетрясений.

Временные вариаций b из разных диапазонов глубин показывают, что в подавляющем большинстве случаях перед землетрясениями с магнитудами $M \geq \text{МПЗ}$ в

окрестности гипоцентров этих событий наблюдаются значимые временные аномалии. Причем максимальные амплитуды таких аномалий сосредоточены вблизи очага с последующим их затуханием при удалении от него. Наблюдаемые временные аномалии b имеют положительной бухтообразной форму и не являются случайными в силу их достаточной статистической представительности (18 событий с $M \geq M_{ПЗ}$). Показано, что качество прогноза можно существенно улучшить, при дифференцированном мониторинге временных вариаций b из разных диапазонов глубин. Делается вывод о том, что используемый подход позволит производить оценку глубины очага прогнозируемого сильного землетрясения.

Делается предположение о возможном детектировании фронта деформационных волн возникающих в определенные интервалы времени в соседних локальных районах выборки. Скорость распространения предполагаемых деформационных волн составляет 40-50 км/год, при направлении фронта распространения с СВ на ЮЗ.

Полученные результаты исследования могут быть использованы для мониторинга и оценки среднесрочной сейсмической опасности в сейсмоактивных регионах.

ВАРИАЦИИ НАКЛОНА ГРАФИКА ПОВТОРЯЕМОСТИ В СЕЗОННОЙ НАВЕДЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ

^{1,2}Потанина М.Г., ^{1,2}Смирнов В.Б., ²Пономарев А.В.,
²Строганова С.М., ^{1,2}Михайлов В.О.

¹*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва*

²*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва*

Годовые вариации уровня воды в водохранилищах позволяют исследовать сезонное возбуждение и релаксацию сейсмического режима. На примере классической области таких исследований Койна-Варна в Западной Индии показано, что сезонные максимумы возбужденной сейсмичности приходятся как на интервал максимальных уровней воды в водохранилищах, так и примерно на середину интервала уменьшения глубин водохранилищ. Этот результат подтверждает известные выводы о наличии, по крайней мере, двух механизмов сезонной активизации – немедленной и задержанной. Оба они связаны с повышением порового давления, в первом случае из-за сжатия каркаса пород и, соответственно, уменьшения объема порового пространства, во втором – из-за диффузии флюида и его порового давления в глубину и в стороны от резервуара по проницаемым разломным зонам. Обнаруженное в области Койна-Варна различие

пространственного положения областей немедленной и задержанной активизаций объясняется различием размеров и локализаций областей повышенных напряжений, создаваемых весом водохранилища в первом случае и пониженной прочностью, обусловленной увеличением порового давления в высокопроницаемых разломных зонах, во втором.

По данным регионального каталога землетрясений выявлены характерные изменения параметров режима сезонной сейсмичности. На интервале активизации, как немедленной (осенней), так и задержанной (весенней) компоненты, наклон графика повторяемости уменьшается, а на интервале уменьшения активности в этих компонентах – увеличивается. В период активизации зимней (декабрь) компоненты, возникшей после затухания осенней и весенней компонент, наклон графика повторяемости увеличивается вместе с увеличением активности.

Полученные результаты указывают на то, что сезонная активизация сейсмического режима сопровождается перераспределением процесса разрушения по его масштабам. Выявленное уменьшение наклона графика повторяемости на стадии активизации сезонной сейсмичности соответствует сценарию укрупнения сейсмических очагов, характерному для процесса слияния и роста трещин (ЛНТ), а увеличение этого параметра на спаде активности отвечает сценарию афтершоковой релаксации. Такие изменения, обнаруженные в сезонных переходных режимах и характерные для процессов подготовки и последствий тектонических землетрясений, свидетельствуют о триггерном характере возбуждения сезонных компонент наведенной сейсмичности, динамика которых подчиняется тем же закономерностям, что и динамика тектонической сейсмичности.

Исследование выполнено в рамках гос. задания ИФЗ РАН.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА С ЦЕЛЬЮ ВЫЯВЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНО УДАРООПАСНЫХ ЗОН

Пугач А.С.

Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”, г. Москва

Тезисы доклада:

1. При компьютерном моделировании требуется рассмотреть большое количество решений, включающих физические свойства геоматериала в широких диапазонах, с учетом неопределенности и, применяя статистическую обработку данных и методы вероятностных гипотез, сопоставить их друг с другом и выявить среди всего спектра результатов общие закономерности.

2. По результатам моделирования, представленным в виде графиков плотностей распределения главных напряжений, следует судить о потенциальной удароопасности. Плотности распределения максимальных главных напряжений определены в очагах горных ударов, имевших место на предприятии, а также в точках, где инцидентов не наблюдалось. Произведено сравнение и выявлен общий характер выявления потенциально удароопасных зон, связанный с начальным полем напряжений.

РАЗЛИЧНЫЕ МОДЕЛЬНЫЕ И ФЕМЕНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ НА ОЧАГ МЕГАЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И РЕАЛЬНЫЕ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЕ ДААННЫЕ

Ребецкий Ю.Л.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

Известно широкое множество моделей очага землетрясений: механические (Рэйд, Рихтер), физические (Мячкин, Соболев, Байерли), морфоструктурные (Аки, Каномри, Дас, Костров), сейсмологические (Гусев). К ним следует добавить и тектонофизическую модель, основанную на результатах инверсии напряжений из сейсмологических индикаторов разрывных деформаций (механизмы очагов землетрясений). В этой работе выполнен анализ состояния в области прогноза землетрясений и современных взглядов геомеханики на зарождение очагов сильных землетрясений. В рамках теории трения, зависящего от Rate&State, с 90-х годов в работах Mory, Rice, Rubin, Reches и др. активно исследована возможность трансформации медленного скольжения в динами-

ческое (сейсмические события) за счет падения прочности в процессе асейсмического скольжения. Рассматривалась возможность разрушения протяженного «запертого» участка разлома в зонах субдукции. Было установлено, что зона асперити не может быть разрушена без предварительного снижения прочности. В ней начинает формироваться локализованный участок асейсмического скольжения, медленно увеличиваясь в размерах. Затем за короткое время по сравнению с сейсмическим скольжением происходит переход от очень медленных скоростей скольжения к сейсмическим. Длительность фазы постепенного ускоренного скольжения может занимать достаточно продолжительное время, т.к. предельный уровень смещений может достигать 20-30 % от сейсмических. Таким образом, за определенное время до землетрясения шероховатость превращается в его оппозицию – зону асейсмического скольжения со сниженным уровнем напряжений.

Полученные результаты тектонофизической инверсии напряжений определяют основную площадь очага мега-землетрясения как протяженную область низких и средних напряжений, что соответствует современным физическим представлениям, указывающим на то, что очаг землетрясения зависит от скорости и состояния теории трения. В реальных породах процессы снижения прочности из-за возрастающего асейсмического смещения могут занимать годы, многие десятилетия, а может быть и столетия. Для наблюдателя, который живет на заключительном этапе подготовки землетрясения, это фактически означает, что сильных землетрясений в зонах субдукции не связаны с асперити, а с теми участкам, где прочность разрушения снижается на большой площади.

Работа выполнена в рамках Госзадания ИФЗ РАН, а также при финансировании в рамках проекта РФФИ 19-55-53025 ГФЕН_а.

ТИПИЧНЫЙ ОБРАЗ ФОР- И АФТЕРШОКОВОГО РЕЖИМА ПРИ СИЛЬНОМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА ОБОБЩЕННОЙ ОКРЕСТНОСТИ СИЛЬНОГО СОБЫТИЯ

^{1,2}Родкин М.В.

¹*Институт теории прогноза землетрясений и
математической геофизики РАН, г. Москва*

²*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск*

Ранее автором был предложен и реализован метод построения и анализа обобщенной окрестности сильного землетрясения (ООСЗ). Метод ООСЗ, путем суммирова-

ния данных по большому числу окрестностей разных сильных землетрясений, обеспечивает радикальный рост объема используемых данных и, соответственно, возможность значительно более детального описания типовых особенностей фор- и афтершокового процесса. Метод объединения данных по значительному числу событий, в простейшем варианте называемый методом наложения эпох, не нов. Применительно к сейсмологии этим способом другими авторами ранее была статистически строго показана тенденция существенного уменьшения величин наклона графика повторяемости землетрясений перед сильными событиями и выявлен ряд особенностей афтершокового процесса. От работ других авторов метод ООСЗ отличается большим (до 1000) числом объединяемых фор- и афтершоковых последовательностей, использованием масштабирования при наложении событий по пространству и преимущественным использованием данных о более сильных землетрясениях.

В ООСЗ хорошо видна форшоковая степенная активизация и афтершоковый процесс, реализующийся согласно закону Омори-Утсу. Кроме этого, для значительного числа параметров (наклона графика повторяемости, средней магнитуды событий и средней глубины землетрясений, величины кажущихся напряжений, продолжительности сейсмического процесса, ряда других характеристик) в ООСЗ наблюдается единообразная по характеру аномалия, увеличивающаяся по амплитуде к моменту обобщенного сильного землетрясения как минус логарифм времени до момента этого события. Подобные аномалии (чаще с разными параметрами) наблюдаются и в форшоковой, и в афтершоковой области. Единообразие этой аномалии дает основание придать ей статус новой закономерности сейсмического режима. Особый интерес представляют предвестниковые аномалии такого типа. Обсуждается, какие из них являются первичными, а какие носят вторичный характер. Дана интерпретация аномалии в терминах модели мультипликативного каскада. Отмечается аналогия характера аномалии с положениями кинетической концепции разрушения Журкова. Обсуждаются подходы к использованию выявленной аномалии в прогнозе землетрясений. Подчеркивается, что в результате построения ООСЗ мы получаем типовую закономерность развития разрушения, причем эта типовая закономерность приложима далеко не только к случаю землетрясений.

ВАРИАЦИИ ПРИЛИВНОЙ КОМПОНЕНТЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ ШУМОВ В ЗОНЕ СТЫКА КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ И АЛЕУТСКОЙ ОСТРОВНЫХ ДУГ

¹Салтыков В.А., ¹Воропаев П.В., ¹Кугаенко Ю.А., ²Черепанцев А.С.
¹Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский
²Южный федеральный университет, г. Таганрог

Проведенный ранее анализ данных, полученных в течение последних 30 лет, выявил ряд особенностей, которые свидетельствуют о модуляции высокочастотного сейсмического шума (ВСШ) приливами и связи ВСШ с различными геофизическими процессами, в том числе с изменением напряженного состояния среды в процессе подготовки. Эти работы носили не только фундаментальный, но и прикладной характер, что связано с актуальностью проблемы сейсмического прогноза. Обнаружено важное свойство отклика ВСШ на приливное воздействие: эффект не является стабильным во времени. В 90-х годах по результатам исследований ВСШ на Камчатке выдвинута гипотеза о связи вариаций фазы приливной компоненты ВСШ с геодинамическими процессами в регионе. Позднее на основе многолетних натурных наблюдений было показано, что приливная чувствительность ВСШ наиболее стабильна и статистически значима в период подготовки сильных локальных землетрясений. Обнаруженный эффект синхронизации процессов лег в основу методики прогноза сильных локальных землетрясений по изменению характера отклика ВСШ на приливное воздействие.

Учитывая, что прогностическая методика основана на наблюдениях ВСШ до середины 2013 г., представляет интерес рассмотреть результаты ее использования в последующее время. Здесь следует отметить, что станция “Начики” была закрыта в сентябре 2015 г. по независящим от КФ ФИЦ ЕГС РАН причинам. Станция “Карымшина” функционирует. В 2017 г. начаты работы по организации еще одного пункта – в районе Усть-Камчатска.

С сентября 2013 г. по май 2019 г. произошло более 20 землетрясений, соответствующих прогнозируемому типу (по соотношению магнитуда-расстояние). Для землетрясений, которые имели предвестник, выделенный по методике ВСШ, в докладе представлены временные участки стабилизации фазового сдвига по данным станций “Начики”, “Карымшина” и “Крутоберегово” с отмеченным временем землетрясения, положение его эпицентра, а также дата подачи прогнозного заключения в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений.

Приведенные данные демонстрируют перспективность используемого подхода для прогноза сильных локальных землетрясений и не противоречат определенным ранее характеристикам методики, включая оценки ее эффективности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-05-00185).

МОДЕЛЬ ЛАВИННО-НЕУСТОЙЧИВОГО ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ — ЛНТ: САМОРАЗВИТИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ

Соболев Г. А.

Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, г. Москва

Основные идеи модели ЛНТ впервые были представлены в докладе сотрудников Института физики Земли РАН на Ассамблее Международного союза геодезии и геофизики в Москве в 1971 г. и опубликованы в специальном выпуске журнала “Tectonophysics” в 1972 г. В дальнейшем были выполнены многочисленные лабораторные и натурные исследования, подтверждающие и развивающие модель ЛНТ. Модель исходит из фундаментальных положений физики длительной прочности. Она не зависит от масштаба явления и может применяться к описанию подготовки разрушения не только в очагах землетрясений разных энергий, но и к динамическим явлениям в шахтах и разрушению инженерных сооружений при длительно действующих нагрузках.

Модель описывает следующие последовательно протекающие процессы: рассеянное по объему накопление трещин; слияние и укрупнение трещин в результате взаимодействия их полей напряжений; постепенное стягивание трещинообразования к поверхности будущего макроразрыва. Локализация неустойчивой деформации в условиях длительно действующих напряжений в не однородных по прочности средах не есть мгновенный процесс, а развивается постепенно. При этом ширина зоны неустойчивой деформации сокращается, а окружающий материал разгружается и частично восстанавливает свои первоначальные свойства. Эти стадии обоснованы результатами лабораторного моделирования и наблюдениями в сейсмоактивных районах. Следствие за их развитием предполагает возможность прогноза времени будущего сейсмического события. С помощью модели объясняется образование широко распространенных эшелонированных систем разрывов. Модель ЛНТ обосновывает саморазвитие процесса разрушения, который протекает в горных породах различной влажности.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА НА СЕЙСМИЧНОСТЬ ЗЕМЛИ

Тарасов Н.Т.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва

Изучено влияние солнечной активности на глобальную сейсмичность Земли. Сначала рассмотрено изменение сейсмичности до и после магнитных бурь с внезапным началом (SSC). Для выделения вызванных изменений сейсмичности на фоне ее естественных вариаций использовалась методика наложения эпох. Получена осредненная (за период 1973-1981 гг.) зависимость ежесуточного количества землетрясений с $M_s > 4.4$ от времени в пределах временных окон ± 30 сут. от SSC. Показано, что после SSC происходит статистически значимое уменьшение количества землетрясений на 2 %, а через 5-6 сут. их число начинает вновь возрастать. Однако отмеченное затухание сейсмичности началось, как минимум, за 2-3 сут. до SSC, что близко к среднему времени их запаздывания относительно солнечных вспышек (СВ), и, следовательно, в этом временном интервале бури не могли быть его причиной.

Поэтому по той же самой методике было изучено изменение сейсмичности до и после резких всплесков мощности ионизирующего электромагнитного излучения СВ (ЭИС), которое достигает Земли всего за 8.2 мин. Оказалось, что после них на Земле происходит резкое статистически высоко значимое (с уровнем $P=0.0001$) уменьшение количества землетрясений, которое точно совпадает с ними по времени. Сразу же после ЭИС число землетрясений падает на 5 %, а затем начинает плавно возрастать. При этом суммарная энергия землетрясений (СЭЗ) на 32 % возрастает, несмотря на уменьшение их количества (т.е. возникают более сильные события). Однако такое повышение статистически не значимо, поскольку после ЭИС значения СЭЗ изменяется во времени сложным образом. Так в первые двое суток они становятся существенно ниже уровня фона, в последующие трое суток – выше и т.д., что может быть связано с различным влиянием, которое SSC и ЭИС оказывают на сейсмичность.

В связи с этим, по той же методике, что и раньше, воздействие на сейсмичность SSC и ЭИС было изучено по двум выборкам. В одну из них были включены только те SSC, до и после которых не наблюдалось резких всплесков интенсивности ЭИС, а в другую вошли всплески ЭИС, до и после которых не фиксировалось возникновение SSC. В первом случае после SSC наблюдалось возрастание СЭЗ на 52 % относительно уровня фона, а во втором, напротив, значения СЭЗ после ЭИС уменьшились на 73 %.

Причем в обоих случаях наблюдаемые изменения были статистически значимы (соответственно, с $P=0.049$ и с $P=0.043$).

Таким образом, оба эти фактора, связанные с солнечной активностью, вызывают уменьшение общего количества землетрясений на Земле. Однако воздействие магнитных бурь приводит к росту их энергии, а влияние всплесков мощности ионизирующего электромагнитного излучения СВ – к ее уменьшению.

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ТРИГГЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ВЗРЫВОВ НА СЕЙСМИЧНОСТЬ

Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В.
Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва

Рассмотрено изменение сейсмичности Гармского района Таджикистана после облучения его коры мощными электромагнитными импульсами (ЭИ) и после подземных ядерных взрывов (ЯВ), произведенных на семипалатинском полигоне за время проведения этих экспериментов. Показано, что воздействие ЯВ, также как и ЭИ, вызывает статистически значимую активизацию сейсмичности и приводит к значительному росту суммарной сейсмической энергии (ССЭ). ЭИ вызывает более сильную активизацию сейсмичности, чем ЯВ. Облучение коры перед ЯВ повышает эффективность их триггерного воздействия, тогда как ЯВ, произведенные перед облучением, снижают эффективность воздействия ЭИ.

В пространстве выявлены две области аномального повышения ССЭ после облучения и взрывов. Одна из них приурочена к активному Дарваз-Каракульскому разлому, а другая – к второстепенному разлому в северной части депрессии. Обе они имеют сложную конфигурацию в виде двух «лепестков», расположенных на разных крыльях этих разломов. В обоих случаях один из «лепестков» проявляется после ЭИ, а второй – после ЯВ. «Лепестки» не пересекались и по глубине. После ЭИ сильный рост ССЭ возникал в приповерхностном слое (0-5 км), а после ЯВ – ниже этого слоя. Показано, что каждая из этих «бабочек» представляет собой единую аномальную область повышенных тектонических напряжений, различные части которой активизируются воздействием определенной физической природы.

Поскольку осталось неясным, что в большей мере определяет возникновение таких областей – геологическое строение или локальные изменения напряжений, триг-

герное воздействие ЯВ было изучено не только в период облучения ЭИ, но и в такие же интервалы до начала и после завершения этих экспериментов. Оказалось, что до и после них таких аномальных областей не наблюдалось. Следовательно, их появление в большей мере связано с концентрацией напряжений, возможно, с подготовкой сильных землетрясений. Однако сильных событий в этих областях так и не произошло, что может быть связано с релаксацией упругих напряжений, вызванных облучением коры.

Важно отметить, что после завершения этих экспериментов в радиусе ~60 км от источника облучения вообще не наблюдалось областей повышенных напряжений. Следовательно, облучение коры привело к их релаксации на обширной территории площадью ~3500 км², но, судя по значительной активизации сейсмичности, вызванной ЯВ, на юго-западной и восточной-юго-восточной окраинах это привело к росту напряжений на периферии облучаемой области.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В СКАЛЬНЫХ ТРЕЩИНОВАТЫХ МАССИВАХ ГОРНЫХ ПОРОД

Токсаров В.Н.
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

В работе приведены результаты определения напряжений в целиках медистого песчаника на руднике Жомарт и в прибортовом массиве Сарбайского карьера, отрабатывающего запасы железной руды. Контроль напряжений в породном массиве осуществлялся с использованием акустоэмиссионного эффекта памяти пород околоскважинного пространства.

Измерения напряжений на руднике Жомарт проводились в барьерном и междукламерном целиках в пределах панели 47. Экспериментами установлено, что распределение вертикальных напряжений по сечению барьерного целика имеет скачкообразный характер, что обусловлено блочным строением пород. Величина вертикальных напряжений колеблется в диапазоне от 15–20 до 30–35 МПа. Расстояние между локальными максимумами, а также между минимумами напряжений в целике составляет порядка 1,0–1,5 м. Скачкообразный характер изменения вертикальных напряжений меньшей величины наблюдается и в междукламерном целике. Размер отдельностей меньше, чем в барьерном целике, и составляет порядка 0,3–0,4 м.

Измерение напряжений в бортах Сарбайского карьера проводилось на трех экспериментальных участках. Первый экспериментальный участок располагался в западной части карьера (гор. -240 м), второй и третий участки – в северо-восточной части карьера

(гор. -280 м и гор. -340 м). Каждый экспериментальный участок включал три замерные станции по три скважины. Всего на девяти замерных станциях исследовано 27 скважин длиной 6–8 м. При проведении экспериментов измерялись горизонтальные напряжения, действующие вдоль борта карьера.

Экспериментами установлено, что распределение горизонтальных напряжений в бортах карьера имеет скачкообразный характер, что обусловлено блочным строением пород. При увеличении глубины с 440 м до 540 м отмечается рост горизонтальных напряжений с 4 до 8,5 МПа.

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ И ФЛЮИДОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА МИКРОСЕЙСМИЧНОСТЬ ПРИ ГИДРОРАЗРЫВЕ ПЛАСТА

Турунтаев С.Б., Зенченко Е.В., Тримонова М.А.,
Зенченко П.Е., Барышников Н.А., Лукина А.А.
Институт динамики геосфер РАН, г. Москва

Одним из наиболее эффективных методов увеличения продуктивности нефтегазовых месторождений является проведение гидравлического разрыва пласта (ГРП). Этот метод заключается в закачке в заданный интервал скважины жидкости до создания избыточного давления, образующего в породе трещину, распространяющуюся в плоскости, перпендикулярной минимальному напряжению. Для оценки положения и геометрических размеров трещины необходим надежный инструмент ее локации. Наиболее доступным и широко применяемым методом локации является микросейсмический мониторинг. Однако получаемые при микросейсмическом мониторинге данные о положении сейсмических источников далеко не всегда позволяют определить положение трещины ГРП, что связано с возбуждением микросейсмических событий не только непосредственно распространяющимся гидроразрывом, но и инициацией подвижек по существующим естественным трещинам за счет диффузии порового давления и изменения напряженного состояния при раскрытии трещины ГРП.

Сложность постановки экспериментов в условиях месторождений заставляет обращаться к лабораторным и численным экспериментам. В предлагаемом докладе будут

рассмотрены результаты лабораторных экспериментов, которые проводятся на лабораторной установке, отличающейся от стандартных формой и размером исследуемых образцов. Лабораторные эксперименты выполняются на насыщенных искусственных пористых образцах, созданных согласно критериям подобия с использованием в качестве модельного материала гипса с добавлением портландцемента. Образец создается непосредственно в камере высокого давления и имеет форму диска диаметром 430 мм и высотой 70 мм. Этот образец насыщается водным раствором гипса и нагружается трехосно вертикальной и двумя горизонтальными нагрузками при помощи специальных камер. В верхней, нижней и боковых частях установки размещены датчики давления, пассивной и активной акустической эмиссии.

В результате проведения серии экспериментов и численных расчетов было найдено, что, если вязкость жидкости гидроразрыва значительно превосходит вязкость пластовой жидкости, источники микросейсмической эмиссии расположены непосредственно вблизи развивающейся трещины, изменения порового давления на расстоянии от трещины недостаточно для инициирования микросейсмических событий. Было найдено также, что для адекватного расчета минимальных сжимающих напряжений по характерным значениям изменения давления в скважине необходимо учитывать пластические свойства породы, диффузию порового давления в окрестности скважины и трещины ГРП за время проведения гидроразрыва, отставание заполнения жидкостью трещины от времени образования и распространения трещины ГРП.

Полученные результаты могут быть использованы для лучшего понимания механики образования и развития трещин ГРП

ОЦЕНКА ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД В ЛАБОРАТОРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ ПО ДАННЫМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

¹Шихова Н.М., ¹Патонин А.В., ²Пономарев А.В., ¹Смирнов В.Б.,
²Кирееenkova С.М., ³Родкин М.В.

¹Геофизическая обсерватория «Борок», пос. Борок, Ярославская обл.

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

³Институт теории прогноза землетрясений и математической
геофизики РАН, г. Москва

На управляемом прессе INOVA в условиях трехосной деформации проведена серия экспериментов на образцах песчаников по оригинальным методикам [1, 2]. В про-

цессе испытания с помощью системы ультразвукового зондирования проводилось прозвучивание образца по 16 направлениям и регистрация волновых форм принимаемых сигналов. Для обработки данных было использовано вычисление спектра мощности методом Уэлча и расчет медианной частоты спектра. С применением многомерного анализа проанализированы различия в изменении формы спектра, смещение медианной частоты в процессе изменения напряженно-деформационного состояния образца. Показано, что эти изменения характеризуют нелинейные составляющие деформаций второго и более высоких порядков и, как было показано в [3], определяются наличием «мягких» неоднородностей в микроструктуре горных пород.

Анализ УЗ сигналов с 16 датчиков позволил идентифицировать неоднородную структуру межпорового, межзернового и трещинного пространства в разных частях образца. Предполагается, что увеличение доли высокочастотной составляющей спектра в процессе нагружения образца связано с переупаковкой зерен и работой краев и вершин микротрещин как дополнительных резонаторов. Выявлен эффект уменьшения медианной частоты сигналов при увеличении нагрузки, что может служить индикатором начала пластической деформации материала.

Предложены метод типизации напряженного состояния объема образца при различных режимах нагружения и алгоритм подразделения горных пород на группы в зависимости от особенностей их внутренней микроструктуры с использованием методов УЗ.

Работа выполнена в рамках гос. задания № 0144-2014-0096 Министерства науки и образования РФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патонин А.В., Пономарев А.В., Смирнов В.Б. Аппаратно-программный лабораторный комплекс для решения задач физики разрушения горных пород // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49. № 1. С. 19-34.
2. Патонин А.В., Шихова Н.М., Пономарев А.В., Смирнов В.Б.. Модульная система непрерывной регистрации акустической эмиссии для лабораторных исследований разрушения горных пород // Сейсмические приборы. 2018. Т. 54, № 3. С.35-55. DOI: 10.21455/si2018.3-3.
3. Шкуратник В. Л., Мартынюк А. Р. Исследование упруго-нелинейных параметров образцов горных пород на основе анализа сдвига резонансной частоты ультразвукового сигнала под влиянием механического нагружения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 7. С. 221-226.

ПРОГНОЗ РАЗРУШЕНИЯ КАМЕННОГО УГЛЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ВРЕМЕННЫХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕГО АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Шкуратник В.Л., Николенко П.В.

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Акустическая эмиссия (АЭ), сопровождающая деформирование пластичных и хрупких горных пород, характеризуется определенной стадийностью, которая отражает процессы развития их поврежденности и создает предпосылки прогноза катастрофического макроразрушения. Однако из-за специфических механических свойств и высокой неоднородности углей, проявления указанной стадийности в них далеко не всегда однозначны, а аномальные изменения традиционных информативных параметров АЭ (активности и суммы импульсов) часто не позволяют однозначно диагностировать стадии разрушения, а тем более предразрушения. В то же время существуют предпосылки того, что спектральные характеристики АЭ должны быть более чувствительны к процессам дефектообразования, особенно на начальных их стадиях. Это связано с тем, что с одной стороны спектральный состав сигналов АЭ однозначно связан с размерами возникающих при механическом нагружении дефектов, а с другой – с тем, что последние выступают в качестве фильтра низких частот.

Были проведены лабораторные исследования на образцах угля Кузнецкого и Печерского угольных бассейнов. Цилиндрические образцы диаметром 50 мм и высотой 100 мм подвергались двум типам механического нагружения – по одноосной схеме и по схеме Кармана в условиях осесимметричного неравнокомпонентного сжатия на установке УДС 65/80. В обоих случаях производилась регистрация основных информативных параметров АЭ, а также полных волновых форм АЭ импульсов.

После завершения лабораторных экспериментов производилось сравнение традиционных информативных параметров АЭ и вычисленных спектрограмм акустических событий. Последние были получены путем прямого преобразования Фурье всех отдельно зарегистрированных импульсов АЭ, при этом для уменьшения влияния случайной компоненты все спектрограммы подвергались процедуре сглаживания в прямоугольном окне как по оси времени, так и по оси частот. Показано, что в процессе нагружения наблюдается существенное и часто скачкообразное изменение спектрального состава АЭ, которое проявляется уже на стадии предразрушения. Таким образом, спектральные характеристики АЭ углей могут рассматриваться в качестве эффективного инструмента прогноза их разрушения.

ОТРАЖЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В РАДОНОВОМ И ТЕМПЕРАТУРНОМ ПОЛЯХ В ЗОНАХ РАСТЯЖЕНИЯ И СЖАТИЯ

Юрков А.К., Козлова И.А., Бирюлин С.В.
Институт геофизики УрО РАН, г. Екатеринбург

Поведение объемной активности радона и температуры в верхней части геологического разреза зависит от характера изменения проницаемости горных пород при изменении геодинамической обстановки. На примере горных ударов показано, что объемная активность почвенного радона (ОАР) при подготовке и реализации события различается для зон сжатия и растяжения [1]. Аналогичная картина наблюдается и при подготовке тектонических землетрясений, меняются только временные и пространственные масштабы. События в ближней зоне-зоне сжатия на кривой ОАР отражаются после выхода аномалии на фоновые значения. Для событий далеких, когда измерение ОАР происходит в зоне растяжения, события отмечаются непосредственно на экстремуме или на нисходящей ветви. Статистическая обработка порядка 600 аномалий ОАР, полученных за 8 лет, на станциях Курильск и Южно-Курильск, из которых 72% связано с тектоническими событиями, показала, что для условий Южных Курил размер зоны сжатия не превышает 70- 80 километров. Следует отметить, что та же статистическая обработка показала, что аномалии ОАР могут вызываться не только изменениями напряженного состояния в точке измерения.

Использование вариаций температуры по скважинам основано на том, что движение жидкости по стволу вызывается изменением напряженного состояния горных пород в том числе и на значительных расстояниях от наблюдательной скважины. Изменение температуры неподвижного датчика в скважине будет зависеть от движения жидкости по стволу, которое, как уже было сказано, вызывается изменением напряженного состояния горных пород. Результаты температурного мониторинга по скважине Куп-1 (Южно-Курильск) показал хорошее отражение процесса подготовки и реализации тектонических землетрясений в температурных кривых [2]. Для скважины Куп-1 характерно снижение температуры перед тектоническими событиями. Такое поведение температуры характерно для зоны растяжения, которой является Курильские острова, в соответствии с положениями тектоники плит.

ЛИТЕРАТУРА

1. Булашевич Ю.П., Уткин В.И., Юрков А.К., Николаев В.В. Изменение концентрации радона в связи с горными ударами в глубоких шахтах // Доклады Академии наук. - 1996. - т. 346. - № 2. - с. 245.

2. Демежко Д.Ю., Юрков А.К., Уткин В.И., Щапов В.А. Температурные изменения в скважине KUN-1 (о. Кунашир), вызванные землетрясением Тохоку (11.03.2011 г., $M = 9.0$) // Доклады академии наук. – 2012. - т. 445. - № 2. - с. 883-887.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Андрианов Семен Валерьевич
andrianovsemen@gmail.com
Санкт-Петербург
ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс»
Стр. 7

Аптикаева Ольга Ивановна
aptikaevaoi@mail.ru
Москва
Институт физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН
к.ф.-м.н.
Стр. 6

Барышников Н.А.
Москва
Институт динамики геосфер РАН
Стр. 69

Барях Александр Абрамович
bar@mi-perm.ru
Пермь
ПФИЦ УрО РАН
д.т.н., чл.-корр. РАН
Стр. 43

Басов Александр Дмитриевич
farhadbek_uz@mail.ru
Санкт-Петербург
ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс»
Стр. 7

Батухтин И.В.
Москва
Институт динамики геосфер РАН
Стр. 31

Бирюлин Сергей Викторович
serrega2009@gmail.com
Екатеринбург
Институт геофизики УрО РАН
Стр. 73

Бельтюков Николай Леонидович
bnl@mi-perm.ru
Пермь
Горный институт УрО РАН
Стр. 8

Богомолов Леонид Михайлович
bleom@mail.ru
Южно-Сахалинск
Институт морской геологии и геофизики
ДВО РАН
Стр. 9

Бубнова Наталия Яковлевна
bubnova@ifz.ru
Москва
Институт физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН
Стр. 10, 11

Будков А.М.
Москва
Институт динамики геосфер РАН
Стр. 31

Бутырин Павел Генрихович
pbg2000@mail.ru
Пермь
Горный институт УрО РАН
к.т.н.
Стр. 11

Варлашова Юлия Викторовна
ula17@mail.ru
Пермь
Горный институт УрО РАН
Стр. 17

Верхоланцев Александр Викторович
vercholancev@gmail.com
Пермь
Горный институт УрО РАН
Стр. 17

Верхоланцев Филипп Геннадьевич
sombra@mail.ru
Обнинск
ФИЦ ЕГС РАН
Стр. 11, 17

Веттегрень Виктор Иванович

Victor.Vettegren@mail.ioffe.ru

Санкт-Петербург

Физико-технический институт

им. А.Ф. Иоффе РАН

д.ф.-м.н.

Стр. 13

Вознесенский Александр Сергеевич

al48@mail.ru

Москва

Горный институт НИТУ МИСиС

Стр. 14

Воропаев Петр Валентинович

Петропавловск-Камчатский

КФ ФИЦ ЕГС РАН

Гиляров Владимир Леонович

vladimir.hilarov@mail.ioffe.ru

Санкт-Петербург

Физико-технический институт

им. А.Ф. Иоффе РАН

д.ф.-м.н.

Стр. 64

Голосов Андрей Михайлович

a-dune@mail.ru

Владивосток

Дальневосточный государственный
технический университет

Стр. 40

Гусева Наталья Сергеевна

natali.guseva.2010@mail.ru

Пермь

Горный институт УрО РАН

Стр. 17

Дамаскинская Екатерина Евгеньевна

kat.dama@mail.ioffe.ru

Санкт-Петербург

Физико-технический институт

им. А.Ф. Иоффе РАН

к.ф.-м.н.

Стр. 15, 16

Дорохин Кирилл Александрович

d.k_a@mail.ru

Санкт-Петербург

ОАО НИПНИ «Ленметрогипротранс»

к.т.н.

Стр. 25

Дягилев Руслан Андреевич

dra@gstras.ru

Обнинск

ФИЦ ЕГС РАН

Пермь

Горный институт УрО РАН

к.ф.-м.н.

Стр. 17, 18, 23, 24

Евсеев Антон Владимирович

Evseev@mi-perm.ru

Пермь

Горный институт УрО РАН

к.т.н.

Стр. 19

Жариков Сергей Николаевич

333vista@mail.ru

Екатеринбург

Институт горного дела УрО РАН

к.т.н.

Стр. 34

Жукова Светлана Александровна

svetlana.zhukowa@yandex.ru

Апатиты

Горный институт КНЦ РАН

к.т.н.

Стр. 20

Завьялов Алексей Дмитриевич

zavyalov@ifz.ru

Москва

Институт физики Земли

им. О.Ю. Шмидта РАН

д.ф.-м.н.

Стр. 4,5,21,29

Зайцев А.В.

Пермь

Пермский национальный исследователь-
ский политехнический университет

Стр. 53

Зайцев Д.В.

Екатеринбург
Уральский федеральный университет,
Институт высокотемпературной
электрохимии УрО РАН
Стр. 55

Закупин А.С.

Южно-Сахалинск
Институт морской геологии и геофизики
ДВО РАН
Стр. 9

Зейгарник Владимир Альбертович

zeigarnik@ihed.ras.ru
Москва
Объединенный институт высоких
температур РАН
д.т.н.
Стр. 22

Зенченко Е.В.

Москва
Институт динамики геосфер РАН
Стр. 69

Зенченко П.Е.

Москва
Институт динамики геосфер РАН
Стр. 69

Злобина Татьяна Викторовна

tati.verkholantseva@gmail.com
Пермь
Горный институт УрО РАН
Стр. 24

Зотов О.Д.

Москва
Институт физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН
пос. Борок, Ярославская обл.
Геофизическая обсерватория «Борок»
Стр. 21

Зубков Альберт Васильевич

Екатеринбург
Институт горного дела УрО РАН
д.т.н.
Стр. 24

Исаев Юрий Сергеевич

isaev45@mail.ru
Санкт-Петербург
ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс»
к.т.н.
Стр. 25, 43

Казначеев Павел Александрович

p_a_k@mail.ru
Москва
Институт физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН
к.т.н.
Стр. 27

Карев В.И.

Москва
Институт проблем механики
им. А.Ю. Ишлинского РАН
Стр. 53

Каримов Фаршед Хилолович

Farshed_karimov@rambler.ru
Душанбе, Таджикистан
Институт геологии, сейсмостойкого строи-
тельства и сейсмологии АН РТ
д.ф.-м.н.
Стр. 28

Киреевкова С.М.

Москва
Институт физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН
Стр. 70

Киселева Елена Алексеевна

kiss@ifz.ru
Москва
Институт физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН
Стр. 43

Кичигин Максим Викторович

Пермь
Горный институт УрО РАН
Стр. 11

Ключкин В.Н.

Москва

Объединенный институт высоких температур РАН

Стр. 22

Коваленко Ю.Ф.

Москва

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

Стр. 53

Козлова Ирина Александровна

ikozlova75@mail.ru

Екатеринбург

Институт геофизики УрО РАН

к.г.-м.н.

Стр. 73

Козырев Анатолий Александрович

stefanovich@goi.kolasc.net.ru

Апатиты

Горный институт КНЦ РАН

д.т.н.

Стр. 20, 32

Корост Д.В.

Москва

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Стр. 16

Корсуков В.Е.

Санкт-Петербург

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

Стр. 15

Корчак Павел Анатольевич

korchak_pa@mail.ru

Кировск

СППГУ, Кировский филиал АО “Апатит”

Стр. 29

Котляр Т.Ф.

Москва

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

Стр. 37, 39

Кочанов Алексей Николаевич

kochanov@mail.ru

Москва

Институт проблем комплексного освоения недр РАН

к.т.н.

Стр. 30, 55

Кочарян Геворг Грантович

gevorgk@idg.chph.ras.ru

Москва

Институт динамики геосфер

им. академика М.А. Садовского РАН

д.ф.-м.н.

Стр. 31

Красилов М.Н.

Москва

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Стр. 14, 33, 34

Криницын Р.Н.

Екатеринбург

Институт горного дела УрО РАН

Стр. 38

Кугаенко Ю.А.

Петропавловск-Камчатский

КФ ФИЦ ЕГС РАН

Стр. 64

Кузнецов Николай Николаевич

nikavalon@mail.ru

Апатиты

Горный институт КНЦ РАН

Стр. 32

Кузьминых Виталий Сергеевич

Пермь

Горный институт УрО РАН

Стр. 57

Кулик В.П.

Санкт-Петербург

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

Стр. 13

Куткин Я.О.

Москва

Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»

Стр. 14, 33, 34

Кутуев Вячеслав Александрович

slavik1988@mail.ru

Екатеринбург

Институт горного дела УрО РАН

Стр. 34

Лебедев Михаил Олегович

lebedev-lmgt@yandex.ru

Санкт-Петербург

ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс»

к.т.н.

Стр. 36

Лементуева Рита Ануфриевна

leto@ifz.ru

Москва

Институт физики Земли

им. О.Ю. Шмидта РАН

Стр. 10, 11, 37, 39

Липин Яков Иванович

Екатеринбург

Институт горного дела УрО РАН

к.т.н.

Стр. 38

Лось В.Ф.

Москва

Институт физики Земли

им. О.Ю. Шмидта РАН

Стр. 37, 39

Лукина А.А.

Москва

Институт динамики геосфер РАН

Стр. 69

Лучникова А.О.

Москва

Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»

Стр. 14

Майбук Зиновий-Юрий Ярославович

rim@ifz.ru

Москва

Институт физики Земли

им. О.Ю. Шмидта РАН

Стр. 27

Макаров Владимир Владимирович

vlmvv@mail.ru

Владивосток

Дальневосточный государственный техни-
ческий университет

д.т.н.

Стр. 40, 41

Мамалимов Р.И.

Москва

Институт физики Земли

им. О.Ю. Шмидта РАН

Санкт-Петербург

Физико-технический институт

им. А.Ф. Иоффе РАН

Стр. 13

Махмудов Хайрулло Файзуллаевич

h.machmoudov@mail.ioffe.ru

Санкт-Петербург

Физико-технический институт

им. А.Ф. Иоффе РАН

к.ф.-м.н.

Стр. 13, 41, 43

Медведев В.Н.

Железногорск

ФГУП «Горно-химический комбинат»

Стр. 41, 43

Михайлов Валентин Олегович

mikh@ifz.ru

Москва

Институт физики Земли

им. О.Ю. Шмидта РАН

Московский государственный

университет им. М.В. Ломоносова

д.ф.-м.н.

Стр. 43, 59

Мишин Сергей Владимирович

mishin@neisri.ru

Магадан

Северо-Восточный комплексный
институт им. Н.А. Шило ДВО РАН
к.ф.-м.н.

Стр. 44, 45, 46

Морозов Владислав Николаевич

morozov@wdcb.ru

Москва

Геофизический центр РАН

д.т.н.

Стр. 47, 48

Морозов Иван Александрович

imorozov.work@yandex.ru

Пермь

Горный институт УрО РАН

Стр. 57

Морозова Ксения Георгиевна

Москва

Институт динамики геосфер РАН

Стр. 48

Мубассарова В.А.

Бишкек, Кыргызстан

Научная станция РАН

Стр. 9

Насибуллин Р.Р.

Москва

Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»

Стр. 33, 34

Николенко Петр Владимирович

Москва

Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»

к.т.н.

Стр. 72

Новиков В.А.

Москва

Объединенный институт высоких
температур РАН

Стр. 54

Окунев В.И.

Москва

Объединенный институт высоких
температур РАН

Стр. 22, 54

Опанасюк Николай Александрович

Владивосток

Дальневосточный государственный техни-
ческий университет

Стр. 40

Остапчук Алексей Андреевич

ostapchuk@idg.chph.ras.ru

Москва

Институт динамики геосфер РАН

к.ф.-м.н.

Стр. 48

Панжин Андрей Алексеевич

panzhin@igduran.ru

Екатеринбург

Институт геофизики УрО РАН

к.т.н.

Стр. 49

Панжина Н.А.

Екатеринбург

Институт геофизики УрО РАН

Стр. 49

Пантелеев Иван Алексеевич

pia@icmm.ru

Пермь

Институт механики сплошных
сред УрО РАН

к.ф.-м.н.

Стр. 16, 51, 52, 53, 54

Панфилов Г.П.

Екатеринбург

Уральский федеральный университет

Стр. 55

Панфилов П.Е.

Екатеринбург

Уральский федеральный университет

Стр. 55

Паньков Иван Леонидович
ivpan@mi-perm.ru

Пермь
Горный институт УрО РАН
к.т.н.
Стр. 56, 57

Патонин Андрей Викторович
patonin@borok.yar.ru
пос. Борок, Ярославская обл.
Геофизическая обсерватория «Борок»
к.т.н.
Стр. 23, 70, 71

Пономарев Александр Вениаминович
avp@ifz.ru
Москва
Институт физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН
д.ф.-м.н.
Стр. 11, 13, 23, 27, 59, 70, 71

Попандопуло Георгий Анатольевич
(Papadopoulos George A.)
gpopandopoulos@gmail.com
Москва
Институт физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН
к.ф.-м.н.
Стр. 58

Потанина Мария Георгиевна
liwo@mail.ru
Москва
Институт физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН,
Московский государственный
университет им. М.В. Ломоносова
Стр. 29, 53

Пугач Александр Сергеевич
Alpugach@mail.ru
Москва
Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»
Стр. 61

Ребецкий Юрий Леонидович
reb@ifz.ru
Москва
Институт физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН
д.ф.-м.н.
Стр. 11, 52, 61

Родкин Михаил Владимирович
rodkin@mitp.ru
Москва
Институт теории прогноза землетрясений и
математической геофизики РАН
Южно-Сахалинск
Институт морской геологии и геофизики
ДВО РАН
д.ф.-м.н.
Стр. 62, 70

Романевич Кирилл Викторович
romanevichkirill@gmail.com
Санкт-Петербург
ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс»
к.т.н.
Стр. 7

Савельев В.Н.
Санкт-Петербург
ООО «Прадиком»
Стр. 41, 43

Салтыков Вадим Александрович
salt@emsd.ru
Петропавловск-Камчатский
КФ ФИЦ ЕГС РАН
д.ф.-м.н.
Стр. 64

Селин Константин Владимирович
Екатеринбург
Институт горного дела УрО РАН
Стр. 24

Сентябов Сергей Васильевич
Sentyabov1989@mail.ru
Екатеринбург
Институт горного дела УрО РАН
к.т.н.
Стр. 24

Смирнов Владимир Борисович

пос. Борок, Ярославская обл.
Геофизическая обсерватория «Борок»
Москва
Московский государственный
университет им. М.В. Ломоносова
Стр. 23, 27, 59, 70, 71

Смолянинова Екатерина Ивановна

Москва
Институт физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН
Стр. 43

Соболев Геннадий Александрович

sobolev@ifz.ru
Москва
Институт физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН
д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН
Стр. 4, 11, 61, 65

Строганова С.М.

Москва
Институт физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН
Стр. 23, 59

Сычев В.Н.

Бишкек, Кыргызстан
Научная станция РАН
Стр. 9

Тарасов Николай Тимофеевич

tarasov@ifz.ru
Москва
Институт физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН
к.ф.-м.н.
Стр. 66, 67

Тарасова Н.В.

Москва
Институт физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН
Стр. 67

Токсаров Валерий Николаевич

toksarov@mi-perm.ru
Пермь
Горный институт УрО РАН
к.т.н.
Стр. 68

Треусов А.В.

Москва
Институт физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН
Стр. 10

Тримонова М.А.

Москва
Институт динамики геосфер РАН
Стр. 69

Турунтаев Сергей Борисович

stur@idg.chph.ras.ru
Москва
Институт динамики геосфер РАН
д.ф.-м.н.
Стр. 69

Тютчева А.О.

Москва
Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»
Стр. 14, 33, 34

Ударцев Артем Александрович

udartsev@mi-perm.ru
Пермь
Горный институт УрО РАН
Стр. 8, 19

Устинов К.Б.

Москва
Институт проблем механики
им. А.Ю. Ишлинского РАН
Стр. 53

Фролов Д.И.

Санкт-Петербург
Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе РАН
Стр. 16

Черепанцев А.С.

Таганрог
Южный федеральный университет
Стр. 64

Шевцов Н.И.

Москва
Институт проблем механики
им. А.Ю. Ишлинского РАН
Стр. 53

Шихова Наталья Михайловна

shinami@yandex.ru
пос. Борок, Ярославская обл.
Геофизическая обсерватория «Борок»
к.б.н.
Стр. 70, 71

Шкуратник Владимир Лазаревич

ftkp@mail.ru
Москва
Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»
д.т.н.
Стр. 71, 72

Шляев Сергей Алексеевич

Санкт-Петербург
ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс»
Стр. 7

Шулаков Денис Юрьевич

shulakov@mi-perm.ru
Пермь
Горный институт УрО РАН
к.т.н.
Стр. 17

Щербаков Игорь Петрович

sherbakov.mhd@mail.ioffe.ru
Москва
Институт физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН
Стр. 13

Юрков Анатолий Константинович

akyurkov@mail.ru
Екатеринбург
Институт геофизики УрО РАН
к.г.-м.н.
Стр. 73, 74

Якупов Р.Р.

Екатеринбург
Уральский федеральный университет
Стр. 55

J. Browning

Santiago, Chile
Pontificia Universidad Católica de Chile
Стр. 51

D. Healy

Aberdeen, UK
University of Aberdeen
Стр. 51

V. Lyakhovsky

Jerusalem, Israel
Geological Survey of Israel
Стр. 51

P.G. Meredith

London, UK
University College London
Стр. 51

T.M. Mitchell

London, UK
University College London
Стр. 51

СОДЕРЖАНИЕ

ЗАВЬЯЛОВ А.Д. История школ семинаров «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород.....	3
АПТИКАЕВА О.И. Сильнейшие землетрясения Ванского района 1976 и 2011 гг. и роевая сейсмичность на фоне поля поглощения S-волн.....	6
БАСОВ А.Д., РОМАНЕВИЧ К.В., ШЛЯЕВ С.А., АНДРИАНОВ С.В. Отражение техногенных и геодеформационных воздействий на спектрограммах электромагнитного излучения.....	7
БЕЛЬТЮКОВ Н.Л., УДАРЦЕВ А.А. Контроль состояния горных пород методом акустической эмиссии.....	8
БОГОМОЛОВ Л.М., ЗАКУПИН А.С., МУБАССАРОВА В.А., СЫЧЕВ В.Н. Новый подход к интерпретации результатов испытаний образцов мрамора на одноосное сжатие и воздействие электромагнитных полей. Информативность деформационных измерений.....	9
БУБНОВА Н.Я., ЛЕМЕНТУЕВА Р.А., ТРЕУСОВ А.В. Смена напряженного состояния по данным коэффициента Лоде-Надаи в экспериментах на образцах горных пород.....	10
БУТЫРИН П.Г., КИЧИГИН М.В., ВЕРХОЛАНЦЕВ Ф.Г. Комплекс организационных и технических мер по обеспечению надежности сети сейсмологического мониторинга.....	11
ВЕТТЕГРЕНЬ В.И., КУЛИК В.П., МАМАЛИМОВ Р.И., МАХМУДОВ Х.Ф., ЩЕРБАКОВ И.П. Механизм и динамика разрушения напряженных гранитов под влиянием ударной волны.....	13
ВЕТТЕГРЕНЬ В.И., ПОНОМАРЕВ А.В., МАМАЛИМОВ Р.И., ЩЕРБАКОВ И.П. Распределение скоростей роста и размеров микротрещин, образующихся при трении горных пород.....	13
ВОЗНЕСЕНСКИЙ А.С., КРАСИЛОВ М.Н., КУТКИН Я.О., ТЮТЧЕВА А.О., ЛУЧНИКОВА А.О. Разрушение образцов горных пород при двухосном циклическом воздействии.....	14
ГИЛЯРОВ В.Л., ДАМАСКИНСКАЯ Е.Е., КОРСУКОВ В.Е. О фрактальной самоорганизации структурных дефектов при разрушении материалов.....	15
ДАМАСКИНСКАЯ Е.Е., ГИЛЯРОВ В.Л., ПАНТЕЛЕЕВ И.А., КОРОСТ Д.В., ФРОЛОВ Д.И. Эволюция дефектной структуры и оценка степени критичности состояния деформированной горной породы.....	16
ДЯГИЛЕВ Р.А., ВАРЛАШОВА Ю.В., ВЕРХОЛАНЦЕВ А.В., ВЕРХОЛАНЦЕВ Ф.Г., ГУСЕВА Н.С., ШУЛАКОВ Д.Ю. Строение очаговой зоны Катав-Ивановского землетрясения 4 сентября 2018 года по инструментальным данным	17
ЕВСЕЕВ А.В., УДАРЦЕВ А.А. Обоснование критических скоростей деформирования междокамерных целиков в условиях ВКМКС.....	19
ЖУКОВА С.А., КОЗЫРЕВ А.А. Мониторинг техногенной сейсмичности Хибинского массива.....	20
ЗАВЬЯЛОВ А.Д., ЗОТОВ О.Д. О некоторых особенностях пространственных распределений афтершоков.....	21

ЗЕЙГАРНИК В.А., КЛЮЧКИН В.Н., ОКУНЕВ В.И. Некоторые соображения в пользу теплового механизма электровоздействия при разрушении образца в экспериментах с одноосным сжатием.....	22
ЗЛОБИНА Т.В., ДЯГИЛЕВ Р.А. Многофакторная оценка влияния природных и техногенных факторов на сейсмическую активность в калийных рудниках.....	23
ЗУБКОВ А.В., СЕНТЯБОВ С.В., СЕЛИН К.В. Прогноз катастрофических разрушений подземных горных выработок в мире на 2020-2030 годы.....	24
ИСАЕВ Ю.С. , ДОРОХИН К.А. Оценка деформационно-прочностных свойств искусственных удерживающих и противофильтрационных подземных сооружений и мероприятий методами сейсмоакустической томографии.....	25
КАЗНАЧЕЕВ П.А., МАЙБУК З.-Ю.Я., ПОНОМАРЕВ А.В. Выделение стадий термического разрушения горных пород по данным о статистике импульсов акустической эмиссии.....	27
КАРИМОВ Ф.Х. Динамика форшоков и афтершоков Мургабского (Сарезского) землетрясения с $M=7.2$ 2015 г. в Таджикистане.....	28
КОРЧАК П.А. Изучение формирования зон хрупкого разрушения пород при строительстве восстающего в перенапряженном породном массиве.....	29
КОЧАНОВ А.Н. Влияние неоднородности и структурных особенностей горных пород на процесс динамического разрушения.....	30
КОЧАРЯН Г.Г., БАТУХТИН И.В., БУДКОВ А.М. Особенности старта и остановки разрыва на сейсмогенных разломах	31
КУЗНЕЦОВ Н.Н., КОЗЫРЕВ А.А. Исследование энергоемкости разрушения скальных горных пород с целью оценки их удароопасности	32
КУТКИН Я.О., КРАСИЛОВ М.Н., ТЮТЧЕВА А.О., НАСИБУЛЛИН Р.Р. Оценка поврежденности горных пород акустическими методами при их статическом и динамическом нагружении и разрушении.....	33
КУТУЕВ В.А., ЖАРИКОВ С.Н. Сейсмическое действие технологических взрывов в карьере на подземные горные выработки.....	34
ЛЕБЕДЕВ М.О. Прогноз напряженно-деформированного состояния системы «обделка – вмещающий массив» транспортных тоннелей для предотвращения природных и техногенных аварий.....	36
ЛЕМЕНТУЕВА Р.А., ЛОСЬ В.Ф., КОТЛЯР Т.Ф. Изучение вариаций различных физических параметров при деформации и разрушении образцов горных пород и модельных материалов.....	37
ЛИПИН Я.И., КРИНИЦЫН Р.В. Структура поля упругих напряжений массива скальных пород при прогнозе геодинамических явлений в недропользовании.....	38
ЛОСЬ В.Ф., ЛЕМЕНТУЕВА Р.А., КОТЛЯР Т.Ф. Электромагнитное излучение и поляризуемость при деформировании и разрушении образцов горных пород.....	39
МАКАРОВ В.В., ГОЛОСОВ А.М., ОПАНАСЮК Н.А. Снижение рисков катастрофических последствий геодинамических явлений при использовании многоканальных методов обнаружения предвестников разрушения горных пород.....	40
МАХМУДОВ Х.Ф., САВЕЛЬЕВ В.Н., МЕДВЕДЕВ В.Н. Акустико-эмиссионный мониторинг геомеханической устойчивости и безопасности эксплуатации некоторых подземных сооружений ФГУП «Горно-химический комбинат» «Росатом».....	41

МИХАЙЛОВ В.О., КИСЕЛЕВА Е.А., БАРЯХ А.А., ИСАЕВ Ю.С., СМОЛЬЯНИНОВА Е.И. Возможности мониторинга динамики развития оседаний земной поверхности на территории г. Березники по снимкам спутника Sentinel.....	43
МИШИН С.В. Об экспериментах в сейсмологии.....	44
МИШИН С.В. Модель процесса землетрясения.....	46
МОРОЗОВ В. Н. Особенности локализации очагов сильных коровых землетрясений.....	47
ОСТАПЧУК А.А., МОРОЗОВА К.Г. Эволюция параметров акустических импульсов в ходе лабораторного сейсмического цикла.....	48
ПАНЖИН А.А., ПАНЖИНА Н.А. Исследование современной геодинамики Урала по данным геодезических измерений.....	49
ПАНТЕЛЕЕВ И.А., V. LYAKHOVSKY, J. BROWNING, P.G. MEREDITH, D. HEALY, T.M. MITCHELL Модель нелинейного упругого деформирования горных пород с ортотропной поврежденностью.....	51
ПАНТЕЛЕЕВ И.А., РЕБЕЦКИЙ Ю.Л. Реконструкция напряженно-деформированного состояния образцов горных пород при их квазистатических испытаниях по данным акустической эмиссии.....	52
ПАНТЕЛЕЕВ И.А., КОВАЛЕНКО Ю.Ф., ШЕВЦОВ Н.И., ЗАЙЦЕВ А.В., КАРЕВ В.И., УСТИНОВ К.Б. Механизм деформирования и разрушения песчаника при неравномерном двухосном сжатии по данным акустической эмиссии.....	53
ПАНТЕЛЕЕВ И.А., ОКУНЕВ В.И., НОВИКОВ В.А. Особенности акустической эмиссии при подготовке подвижки по модельному разлому.....	54
ПАНФИЛОВ Г.П., ЯКУПОВ Р.Р., ЗАЙЦЕВ Д.В., ПАНФИЛОВ П.Е., КОЧАНОВ А.Н. Особенности развития микротрещин в лабораторных образцах горных пород в поле растягивающих напряжений.....	55
ПАНЬКОВ И.Л. К оценке естественных полей напряжений горных пород, находящихся в условиях тектонического воздействия.....	56
ПАНЬКОВ И.Л., МОРОЗОВ И.А., КУЗЬМИНЫХ В.С., О возможности применения не-локальных критериев разрушения к соляным породам.....	57
ПОПАНДОПУЛО Г.А. Среднесрочный прогноз глубины сильного землетрясения по данным параметра b-value закона Гуттенберга-Рихтера.....	58
ПОТАНИНА М.Г., СМЕРНОВ В.Б., ПОНОМАРЕВ А.В., СТРОГАНОВА С.М., МИХАЙЛОВ В.О. Вариации наклона графика повторяемости в сезонной наведенной сейсмичности.....	59
ПУГАЧ А.С. Копьютерное моделирование процессов разрушения угольного пласта с целью выявления потенциально удароопасных зон.....	61
РЕБЕЦКИЙ Ю.Л. Различные модельные и феноменологические представления на очаг мегаземлетрясения и реальные тектонофизические данные.....	61
РОДКИН М.В. Типичный образ фор- и афтершокового режима при сильном землетрясении по результатам анализа обобщенной окрестности сильного события.....	62
САЛТЫКОВ В.А., ВОРОПАЕВ П.В., КУГАЕНКО Ю.А., ЧЕРЕПАНЦЕВ А.С. Вариации приливной компоненты сейсмических шумов в зоне стыка Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг.....	64
СОБОЛЕВ Г. А. Модель лавинно-неустойчивого трещинообразования – ЛНТ: саморазвитие процесса разрушения.....	65

ТАРАСОВ Н.Т. Влияние электромагнитного излучения Солнца на сейсмичность Земли.....	66
ТАРАСОВ Н.Т., ТАРАСОВА Н.В. Геодинамические последствия триггерного воздействия электромагнитных полей и взрывов на сейсмичность.....	67
ТОКСАРОВ В.Н. Некоторые результаты инструментального определения напряжений в скальных трещиноватых массивах горных пород	68
ТУРУНТАЕВ С.Б., ЗЕНЧЕНКО Е.В., ТРИМОНОВА М.А., ЗЕНЧЕНКО П.Е., БАРЫШНИКОВ Н.А., ЛУКИНА А.А. Влияние геомеханических и флюидодинамических параметров на микро-сейсмичность при гидроразрыве пласта.....	69
ШИХОВА Н.М., ПАТОНИН А.В., ПОНОМАРЕВ А.В., СМИРНОВ В.Б., КИРЕЕНКОВА С.М., РОДКИН М.В. Оценка петрофизических свойств горных пород в лабораторном эксперименте по данным ультразвукового зондирования.....	70
ШКУРАТНИК В.Л., НИКОЛЕНКО П.В. Прогноз разрушения каменного угля на основе анализа временных и спектральных характеристик его акустической эмиссии..	72
ЮРКОВ А.К., КОЗЛОВА И.А., БИРЮЛИН С.В. Отражение сейсмических событий в радоновом и температурном полях в зонах растяжения и сжатия.....	73
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ.....	75

Научное издание

ХI всероссийская школа-семинар
с международным участием

Тезисы докладов

Рекомендовано к изданию Ученым советом «ГИ УрО РАН» - филиала
Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН
Протокол № 7 от 12.09.2017

Компьютерная верстка: Верховланцев Ф.Г.

ISBN 978-5-91682-048-5



Сдано в набор 03.10.2019. Подписано в печать 04.10.2019.

Формат 60х90/8.

Тираж 300 экз. Заказ № 190692

Отпечатано в ООО «Интер-ЕС»

г. Пермь, ул. Плеханова, 39, Тел. (342) 215-01-70