

Федеральное агентство научных организаций
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ДИНАМИКИ ГЕОСФЕР
Российской академии наук
Российский фонд фундаментальных исследований

IV-я ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ

ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ГЕОСИСТЕМАХ

6-9 июня 2017 г., Москва

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

МОСКВА

УДК 550.3; 551.2; 551.3

Триггерные эффекты в геосистемах: тезисы докладов IV Всероссийской конференции с международным участием, Москва, 6-9 июня 2017 г. М.: ГЕОС, 2017. 116 с.

В сборнике содержатся тезисы докладов, представленных на IV Всероссийской конференции с международным участием «Триггерные эффекты в геосистемах» 6-9 июня 2017 г. (Москва). В тезисах отражены актуальные вопросы воздействия природных и антропогенных факторов на различные геосферы, геомеханические системы и техногенные объекты, находящиеся в субкритическом состоянии, а также влияние этих воздействий на систему "атмосфера-ионосфера".

ОРГАНИЗАТОРЫ:

Федеральное агентство научных организаций (ФАНО)

Российская академия наук (РАН)

Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ)

Институт динамики геосфер Российской академии наук (ИДГ РАН)

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ ОРГКОМИТЕТА: *В.В. Адушкин* – академик РАН, ИДГ РАН

ЗАМЕСТИТЕЛИ ПРЕДСЕДАТЕЛЯ ОРГКОМИТЕТА: *Г.Г. Кочарян* – д.ф.-м.н., *А.Н. Ляхов* – к.т.н., ИДГ РАН

СЕКРЕТАРЬ ОРГКОМИТЕТА: *А.Н. Беседина* – к.ф.-м.н., ИДГ РАН

ЧЛЕНЫ ОРГКОМИТЕТА:

Н.В. Болдовский – д.г.-м.н., ИДГ РАН

Б.Г. Гаврилов – д.ф.-м.н., ИДГ РАН

А.Д. Гвишиани – академик РАН, ГЦ РАН

А. Дыскин – профессор, университет Западной Австралии (Австралия)

В.А. Зейгарник – д.т.н., ОИВТ РАН

В.И. Куркин – д.ф.-м.н., ИСЗФ СО РАН

В.Б. Лапшин – д.ф.-м.н., МГУ

Л.И. Лобковский – чл.-корр. РАН, ИО РАН

А.А. Маловичко – чл.-корр. РАН

Н.Н. Михайлова – д.ф.-м.н., КНЦД (Казахстан)

П.И. Пигулевский – д.г.-м.н., ИГ НАН Украины (Украина)

А.В. Пономарев – д.ф.-м.н., ИФЗ РАН

В.В. Ружич – д.г.-м.н., ИЗК СО РАН

Г.А. Соболев – чл.-корр. РАН, ИФЗ РАН

Ци Чен Чжи (Chegzhi Qi) – д.ф.-м.н., Пекинский университет Гражданского Инжиниринга и Архитектуры (Китай)

С.А. Шапиро – профессор, Берлинский университет Фрай (Германия)

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ:

С.Б. Турунтаев – д.ф.-м.н., ИДГ РАН - председатель

С.Д. Викторов – д.т.н., ИПКОН РАН

А.В. Гульельми – д.ф.-м.н., ИФЗ РАН

Ю.И. Зецер – д.ф.-м.н., ИДГ РАН

А.Ф. Ревуженко – д.ф.-м.н., ИГД СО РАН

Ю.Л. Ребецкий – д.ф.-м.н., ИФЗ РАН

А.А. Спивак – д.ф.-м.н., ИДГ РАН

А.В. Тащилин – д.ф.-м.н., ИСЗФ СО РАН

С.И. Шерман – д.г.-м.н., ИЗК СО РАН

Ответственные редакторы:

академик РАН *В.В. Адушкин*, д.ф.-м.н. *Г.Г. Кочарян*

СОДЕРЖАНИЕ

MECHANISM UNDERLYING DEPENDENCE OF VISCOSITY OF ROCK BLOCK CONTACT INTERFACE ON SLIDING VELOCITY <i>Qi Chengzhi, Ban Liren, G.G Kocharyan</i>	12
О ВЛИЯНИИ ТРИГГЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ СЛАБЫХ ВИБРАЦИЙ В МАССИВЕ ПОРОД НА СОСТОЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНО ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ <i>Н.Н. Абрамов, Е.В. Кабеев</i>	12
ДИНАМИКА ЭНЕРГООБМЕННОГО ПРОЦЕССА В ИНТЕРВАЛЕ "ВРЕМЕННОЙ ЗАДЕРЖКИ ΔT ", ВЫЗВАННОГО ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СНИЖЕНИЯ РИСКА МАКРОРАЗРУШЕНИЯ <i>А.А. Авагимов, В.А. Зейгарник, В.И. Окунев</i>	13
ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ЭМИССИИ МЕТАНА В ПОЛЯРНОЙ ЗОНЕ <i>В. В. Адушкин, В. П. Кудрявцев</i>	13
ПРИЛИВНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЯХ И АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ <i>В.В. Адушкин, А.А.Спивак, Ю.С. Рыбнов и др.</i>	14
ЭФФЕКТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН С ТУРБУЛЕНТНЫМ ВЕТРОВЫМ ШУМОМ <i>В.В. Адушкин, Ю.С. Рыбнов, А.А. Спивак, В.А. Харламов</i>	14
СОПОСТАВЛЕНИЕ GPS-ДАННЫХ С РЕЗУЛЬТАТАМИ РЕКОНСТРУКЦИИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КОРЫ ВЫСОКОЙ АЗИИ ПО ДАННЫМ О МЕХАНИЗМАХ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ <i>Р.С. Алексеев</i>	15
УСТОЙЧИВЫЕ И ВЗРЫВНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ГЕОБЛОКОВ В СЕЙСМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ РАЗЛОМАХ <i>С. А. Арсеньев</i>	16
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ НЕОБРАТИМОЙ ДЕФОРМАЦИИ И АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ КАРСТА <i>Р.А. Бакеев, Ю.П. Стефанов, А.А. Дучков</i>	16
ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПОРИСТЫХ СРЕД ПРИ ОДНОФАЗНОЙ И ДВУХФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ <i>В.Л. Барабанов</i>	17
ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И ТРИГГЕРНЫЙ ЭФФЕКТ В РАЗРУШЕНИИ МАССИВА ПОРОД НА ШАХТЕ ХУАФЭН <i>А.С. Батузин, В.Н. Одинцев, Лицзян Юй</i>	18
УТОЧНЕНИЕ ИСХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТЕРМИНИРОВАННО-ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ D-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ И СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАДИОФИЗИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ <i>С.З. Беккер</i>	18
ИОНОСФЕРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ДО, ВО ВРЕМЯ И ПОСЛЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ <i>А.Ю. Белинская, А.А. Ковалев</i>	19
ИССЛЕДОВАНИЕ РАДОНОВОЙ АКТИВНОСТИ РАЗЛОМОВ В ПРИБАЙКАЛЬЕ: К ПРОБЛЕМЕ ВЫБОРА МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ПУНКТОВ ЭМАНАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА <i>А.А. Бобров, М. Билгуун</i>	19
НЕРАВНОМЕРНОСТЬ СУТОЧНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ КАК ПРОЯВЛЕНИЕ ТРИГГЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ <i>Л.М. Богомолов, Т.Е. Воронина, А.С. Закупин и др.</i>	20
К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМАХ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ В ГЕОМАТЕРИАЛАХ (ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ) <i>Л.М. Богомолов, В.А. Мубассарова, А.С. Закупин</i>	20
ЭКЗОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И СЕЙСМИЧНОСТЬ <i>В.Н. Боков, С.В. Лебедев</i>	21

СТРУКТУРА ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ (РАЗЛОМНЫХ) ЗОН, СКОРОСТЬ ДЕФОРМАЦИИ И ИХ СВЯЗЬ С СЕЙСМИЧНОСТЬЮ	
<i>Е.Г. Бугаев, С.Б. Кишкина</i>	21
БЕРДЯНСКОЕ (ОСИПЕНКОВСКОЕ), 2006 г., И МАРИУПОЛЬСКОЕ, 2016 г. ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В ЗОНЕ СЕВЕРО-АЗОВСКОГО РАЗЛОМА: МАКРОСЕЙСМИЧЕСКОЕ ПОЛЕ, МЕХАНИЗМ ОЧАГА, МИГРАЦИЯ	
<i>И.П. Габсатарова, А.А. Никонов, Л.Д. Флейфель</i>	22
ВОЗМУЩЕНИЕ СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 20 МАРТА 2015 г.	
<i>Б.Г. Гаврилов, Ю.В. Поклад, И.А. Ряховский, В.М. Ермак</i>	23
ВОЛНОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ПЛАСТ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ, ЗАПОЛНЕННОЙ СЖИМАЕМОЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТЬЮ	
<i>О.Р. Ганиев, А.В. Звягин, Л.Е. Украинский</i>	23
БЫСТРЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ЗОНЕ РАЗЛОМА С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ МЕХАНИКИ СИСТЕМ С НЕСМЕЖНЫМИ ФОРМАМИ РАВНОВЕСИЯ	
<i>И.А. Гарраш</i>	24
АППАРАТНО-ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА МАГНУС ДЛЯ МОНИТОРИНГА И ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ	
<i>А.Д. Гвишиани, А.А. Соловьев, Р.И. Красноперов, Р.Ю. Лукьянова</i>	24
«ПОДВОДНЫЕ КАМНИ» ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ	
<i>А.А. Годзиковская</i>	25
ЭКСПАНСИЯ НЕФТЕГАЗОДОБЫЧИ И ПОДЗЕМНЫЕ ЯДЕРНЫЕ ВЗРЫВЫ КАК СПУСКОВОЙ КРЮЧОК СТРЕМИТЕЛЬНОГО ДРЕНИРОВАНИЯ АРАЛЬСКОГО МОРЯ ПОД ПЛАТО УСТЮРТ И В КАСПИИ	
<i>Б.Н. Голубов</i>	25
ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ НА ПАРАМЕТРЫ ШУМАНОВСКИХ РЕЗОНАНСОВ	
<i>Е.С. Гончаров, А.Н. Ляхов, Т.В. Лосева</i>	26
НАБЛЮДЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ, ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ И ИЗГИБНО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ В АКВАТОРИЯХ, ПОКРЫТЫХ ЛЬДОМ	
<i>П.Д. Груздев, Р.А. Жостков, А.Ю. Мореев и др.</i>	27
НЕЛИНЕЙНЫЕ ФРИКЦИОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ БЛОКА НА ДВИЖУЩЕМСЯ РАЗЛОМЕ	
<i>А.Ю. Губарь</i>	27
123 ГОДА ПОСЛЕ ОТКРЫТИЯ ОМОРИ	
<i>А.В. Гульельми, О.Д. Зотов, А.Д. Завьялов, И.П. Лавров</i>	28
ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В МАГНИТОСФЕРЕ: К СТОЛЕТИЮ В.А. ТРОИЦКОЙ	
<i>А.В. Гульельми, А.С. Потапов, Б.В. Довбня и др.</i>	28
ГРАНИЦА МОХО – КАК РЕГУЛЯТОР СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В ЗОНЕ СУБДУКЦИИ	
<i>И.Л. Гуфельд, О.Н. Новоселов</i>	29
ОБРАЗОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ МАКРОРАЗРЫВА В ДЕФОРМИРОВАННОМ ОБРАЗЦЕ ГРАНИТА: АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ И РЕНТГЕНОВСКАЯ ТОМОГРАФИЯ	
<i>Е.Е. Дамаскинская, И.А. Пантелеев, Д.Р. Гафурова и др.</i>	30
СПОСОБ ПРОГНОЗА ШУМА НИЗКОЧАСТОТНОЙ ДЕКОНВОЛЮЦИИ: РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВ НА СИНТЕТИЧЕСКИХ И ЛАБОРАТОРНЫХ ДАННЫХ	
<i>П.А. Дергач, В.И. Юшин</i>	30
ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ДОБРОТНОСТНЫХ СВОЙСТВ ЗЕМНОЙ КОРЫ ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА	
<i>А.И. Дубянский, М.А. Ефременко</i>	31
ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТУВЫ ПО ФОНОВОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ И ПО АФТЕРШОКОВЫМ ПРОЦЕССАМ КРУПНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ	
<i>А.А. Еманов, А.Ф. Еманов, Е.В. Лескова</i>	32
РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА НАВЕДЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ В КУЗБАССЕ	
<i>А.А. Еманов, А.Ф. Еманов, А.В. Фатеев и др.</i>	32
ПОГЛОЩЕНИЕ «ДИНАМИЧЕСКОЙ» КРЕПЬЮ ЭНЕРГИИ ГОРНЫХ УДАРОВ, ВЫЗВАННЫХ ТРИГГЕРНЫМ ЭФФЕКТОМ ШАХТНОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ В УСЛОВИЯХ РАЗРАБОТКИ УДАРООПАСНЫХ РУДНИКОВ	

<i>В.А. Еременко, М.А. Косырева</i>	33
ПРОСТРАНСТВЕННОЕ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ И ВРЕМЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВЗРЫВАХ ПО ФОРМИРОВАНИЮ ЭЛЕМЕНТОВ ГЕОТЕХНОЛОГИИ	
<i>А.А. Еременко, В.Н. Филиппов, А.И. Конури</i>	34
ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООВОГО ПОЛЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ	
<i>Ж.Ш. Жантаев, А.В. Виляев</i>	34
ДИАГНОСТИКА ВАРИАЦИЙ ПОЛЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ УЧАСТКОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПО ДАННЫМ GPS НАБЛЮДЕНИЙ	
<i>Ж.Ш. Жантаев, А.В. Виляев</i>	35
ИЗУЧЕНИЕ СЕЙСМОУСТОЙЧИВОСТИ ГОРНОГО МАССИВА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ВЕДЕНИЯ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ НА ПРЕДЕЛЬНОМ КОНТУРЕ КАРЬЕРА	
<i>С.Н. Жариков</i>	35
ЭФФЕКТ СЕЙСМИЧЕСКОГО ЭХА В АФТЕРШОКОВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯХ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ: СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ	
<i>А.Д. Завьялов, О.Д. Зотов, А.В. Гульельми, И.П. Лавров</i>	36
ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ КОМПОНЕНТ ТЕНЗОРА НАПРЯЖЕНИЙ НА ОБРАЗОВАНИЕ МЕТАНА ИЗ НАГРУЖЕННОГО УГЛЯ	
<i>В.Н. Захаров, О.Н. Малинникова</i>	37
ВОЗМУЩЕНИЯ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ НАД ЮЖНОЙ АМЕРИКОЙ В СЕЙСМОАКТИВНЫЙ ПЕРИОД ФЕВРАЛЯ – МАРТА 2010.	
<i>В.И. Захаров, А.Ф. Хамидуллин</i>	38
ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ СКОЛЬЖЕНИЯ МОДЕЛЬНОГО РАЗЛОМА ПРИ ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ	
<i>В.А. Зейгарник, В.А. Новиков, В.Н. Ключкин</i>	38
ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СРЕДЫ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА В ЛАБОРАТОРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ	
<i>Е.В. Зенченко, А.К. Айгожиева, Н.А. Барышников и др.</i>	39
ВЛИЯНИЕ НАПОРНЫХ, НАСЫЩЕННЫХ ГАЗАМИ ФЛЮИДОВ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СРЕДЫ ОБРАЗОВАНИЯ ОРОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА	
<i>Т.М. Злобина, В.А. Петров, В.Ю. Прокофьев, А.А. Котов</i>	40
О НОВЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ДИНАМИКИ ПОТОКА АФТЕРШОКОВ	
<i>О.Д. Зотов, А.Д. Завьялов, А.В. Гульельми, И.П. Лавров</i>	40
ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ МАГНИТОСФЕРЫ В ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ	
<i>О.Д. Зотов, Б.И. Клайн</i>	41
ЭКЗОГЕННОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЗЕМНОЙ КОРЕ	
<i>А.В. Зубков, И.В. Бирючев, К.В. Селин, С.В. Сентябрьков</i>	41
ТЕХНОЛОГИЯ ПОИСКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ НА ОСНОВЕ РЕГИСТРАЦИИ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ФЛЮИДНЫХ СИСТЕМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НИХ ЭНЕРГИИ РЕЗОНАНСОВ ГРАВИТАЦИОННЫХ ПРИЛИВОВ	
<i>А.А. Кабанов, В.Г. Сибгатулин, В.М. Агафонов</i>	42
ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННЫХ РАЗРУШЕНИЙ ГОРНЫХ ПОРОД	
<i>П.А. Казначеев, З.-Ю.Я. Майбук, А.В. Пономарев и др.</i>	42
ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ МЕХАНОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЯХ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ	
<i>А.Н. Камшилин</i>	43
ИЗУЧЕНИЕ МЕТЕОРНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПО КОМБИНИРОВАННЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ	
<i>А. П. Карташова, Ю. С. Рыбнов, Д. О. Глазачев и др.</i>	43
ЭФФЕКТЫ КОГЕРЕНТНОГО ПОВЕДЕНИЯ ФОНОВОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА В СВЯЗИ С СИЛЬНЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ (на примере Камчатского региона)	
<i>В.А. Касимова, Г.Н. Копылова, А.А. Любушин</i>	44
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАЗРЫВОВ	

В ПОВРЕЖДАЕМЫХ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИХ СРЕДАХ	
<i>А.Б. Киселев, П.П. Захаров</i>	44
ВОЗМОЖНОСТЬ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ТЕХНОГЕННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ	
<i>С.Б. Кишкина</i>	45
ЭНЕРГООБМЕН В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ РАЗРАБОТКЕ УДАРООПАСНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ	
<i>А.А. Козырев, В.И. Панин, О.Г. Журавлева</i>	45
ВЛИЯНИЕ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА ПРОЯВЛЕНИЕ СЕЙСМИЧНОСТИ НА РУДНИКАХ ХИБИНСКОГО МАССИВА	
<i>А.А. Козырев, И.Э. Семенова, О.Г. Журавлева</i>	46
НАТУРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЙОНЕ ПОЛИГОНА ЗАКАЧКИ ЖИДКОСТИ НА САХАЛИНСКОМ ШЕЛЬФЕ	
<i>А.В. Коновалов, А.А. Степнов, А.В. Гаврилов и др.</i>	47
ВЛИЯНИЕ СЕЙСМИЧНОСТИ НА ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ (ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ НА СКВАЖИНАХ И ИСТОЧНИКАХ КАМЧАТКИ)	
<i>Г.Н. Копылова</i>	47
ОСОБЕННОСТИ ФЛЮИДОДИНАМИКИ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ (ПО ДАННЫМ УРОВНЕМЕРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В СКВАЖИНАХ КАМЧАТКИ)	
<i>Г.Н. Копылова, С.В. Болдина, В.А. Касимова</i>	48
О ФЛУКТУАЦИЯХ НАПРЯЖЕНИЙ В ГЕОМАТЕРИАЛАХ В ПРОЦЕССЕ ДЛИТЕЛЬНЫХ СЛАБЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ	
<i>В.П. Косых, П.В. Косых</i>	49
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РЕЖИМОВ СКОЛЬЖЕНИЯ РАЗЛОМОВ	
<i>Г.Г. Кочарян</i>	49
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ИНФРАЗВУКОВЫЕ ПОЛЯ, ГЕНЕРИРУЕМЫЕ ПОЛЯРНЫМИ СИЯНИЯМИ	
<i>А.В. Крашенинников, Ю.С. Рыбнов, С.П. Соловьев</i>	50
ЭНДОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ КАК ТРИГГЕР КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ОПОЛЗНЯ 03.06.2007 г. В ДОЛИНЕ ГЕЙЗЕРОВ (КАМЧАТКА)	
<i>Ю.А. Кугаенко</i>	50
УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В СИСТЕМЕ: ЛИТОСФЕРА, АТМОСФЕРА, ИОНОСФЕРА	
<i>В.В. Кузнецов</i>	51
КВЕЙК – КАК ВОЗМОЖНЫЙ КВАНТОВЫЙ МЕХАНИЗМ ТРИГГЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ	
<i>В.В. Кузнецов, И.В. Кузнецов</i>	52
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ РАЗГРУЗКИ САМОНАПРЯЖЕННЫХ ОБРАЗЦОВ ГЕОМАТЕРИАЛОВ	
<i>С.В. Лавриков, О.А. Микенина, А.Ф. Ревуженко</i>	53
О ПЕРИОДИЧНОСТЯХ В СЕЙСМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ И ИХ СВЯЗИ С КОСМОГЕННЫМИ ФАКТОРАМИ	
<i>Е.А. Левина</i>	53
ОБЛАСТИ ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНОЙ КОНВЕРГЕНЦИИ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТО-ПОТОКОВ	
<i>М.Г. Леонов, Р.Г. Гарецкий</i>	53
ИНТРАБАСЕЙНОВЫЕ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЕ МОРФОСТРУКТУРЫ ПО ДАННЫМ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	
<i>М.Г. Леонов, Ю.А. Морозов, Ю.П. Стефанов, Р.А. Бакеев</i>	54
ВОПРОС ДАЛЬНОДЕЙСТВИЯ АНОМАЛИИ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ В СРЕДЕ, НАХОДЯЩЕЙСЯ В ЗАКРИТИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ	
<i>А.С. Лермонтова, Ю.Л. Ребецкий</i>	55
РОЛЬ БЛОКОВОЙ СТРУКТУРЫ ЭПИЦЕНТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ЧУЙСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В ФОРМИРОВАНИИ СТРУКТУРЫ АФТЕРШОКОВ	
<i>Е.В. Лескова, А.А. Еманов, А.Ф. Еманов, А.В. Фатеев</i>	56
ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ЛИТОСФЕРЕ И ИХ УЧЕТ ПРИ ПРОГНОЗЕ И ПРЕДУПРЕЖДЕНИИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ В НЕДРОПОЛЬЗОВАНИИ	
<i>Я.И. Липин, Р.В. Криницын</i>	57

ТЕХНОГЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЛОВОЗЕРСКОГО РЕДКОМЕТАЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ	
<i>А.В. Ловчиков</i>	58
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ШУМОВ GPS	
<i>А.А. Любушин</i>	58
ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ РУДАХ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ УПРУГИХ ВОЛН	
<i>З.-Ю.Я. Майбук</i>	59
ОТЗЫВ РУДОСОДЕРЖАЩЕГО МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ИМПУЛЬС	
<i>З.-Ю.Я. Майбук, Г.А. Соболев</i>	60
МЕДЛЕННЫЕ ВОЛНЫ ДЕФОРМАЦИИ КАК ТРИГГЕРЫ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ	
<i>П.В. Макаров, А.Ю. Перышкин</i>	60
ОСОБЕННОСТИ СТАТИСТИКИ ФЛУКТУАЦИЙ НДС ПРЕДКРИТИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ НАГРУЖЕННОЙ ПРОЧНОЙ СРЕДЫ	
<i>П.В. Макаров, И.Ю. Смолин, А.С. Кульков и др.</i>	61
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ГЕНЕРАЦИИ АНОМАЛИЙ OLR ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ	
<i>А.А. Малашин, В.Л. Натяганов, С.А. Шопин</i>	61
СКАЧКООБРАЗНОСТЬ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ В ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ	
<i>К.М. Мирзоев, А.В. Николаев, С.Х. Негматуллаев</i>	62
ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ЛЕДНИКОВЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ «ВЫСОКОГО» ТЯНЬ-ШАНЯ (по сейсмическим записям Казахстанских станций мониторинга)	
<i>Н.Н. Михайлова</i>	63
РЕАКЦИЯ МАТЕРИАЛОВ ГОРНЫХ ПОРОД НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ, ОТРАЖЕННАЯ В ДЕФОРМАЦИОННЫХ И АКУСТОЭМИССИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ	
<i>В.А. Мубассарова, Л.М. Богомолов, А.С. Закупин, И.А. Пантелеев</i>	63
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗОНЫ СУБДУКЦИИ ТОХОКУ. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭКЗОГЕННЫХ И ЭНДОГЕННЫХ ФАКТОРОВ	
<i>Д.С. Мягков</i>	64
ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ЛИТОСФЕРЕ МЕТОДАМИ АНАЛИТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	
<i>Д.С. Мягков, Ю.Л. Ребецкий</i>	65
ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МАГМАТИЧЕСКИХ СТРУКТУР ВУЛКАНА ЭЛЬБРУС ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ЛИТОСФЕРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ БАКСАНСКИМ ЛАЗЕРНЫМ ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ-ДЕФОРМОГРАФОМ	
<i>А.В. Мясников, В.К. Милюков</i>	65
НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ – МИФ ИЛИ РЕАЛЬНОСТЬ В УСЛОВИЯХ ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА	
<i>Л.И. Надежка, А.Е. Семенов, И.Н. Сафронич</i>	66
ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	
<i>Л.А. Назаров, Л.А. Назарова, Н.А. Мирошниченко и др.</i>	67
ОБЛАЧНЫЕ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ: ОТ АНАЛИЗА КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ К ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ МОДЕЛЯМ	
<i>В.Л. Натяганов, А.Н. Скибицкий, И.В. Степанов, С.А. Шопин</i>	67
НЕМАТЕРИАЛЬНОЕ ЭКЗОГЕННОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ И СЕЙСМИЧНОСТИ	
<i>А.В. Николаев</i>	68
МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ТОКА В РАЗЛОМНОЙ ЗОНЕ	
<i>В.А. Новиков, В.Н. Ключкин, В.Ю. Рикман</i>	68
ВЛИЯНИЕ НОРМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ В ИМИТАТОРЕ РАЗЛОМА НА ТРАНСФОРМАЦИЮ РЕЖИМА ЕГО СКОЛЬЖЕНИЯ	
<i>В.А. Новиков, Г.Г. Кочарян</i>	69

О ВОЗМОЖНОСТИ ТРАНСФОРМАЦИИ РЕЖИМА «СТИК-СЛИП» В КРИП ЗА СЧЕТ ИНЖЕКЦИИ ВОДЫ В РАЗЛОМНУЮ ЗОНУ <i>В.А. Новиков, Г.Г. Кочарян</i>	69
ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ НА СЕЙСМИЧЕСКИЙ ЦИКЛ <i>В.А. Новиков, В.И. Окунев, В.Н. Ключкин</i>	70
ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ В НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫХ ОБРАЗЦАХ ГОРНЫХ ПОРОД <i>В.А. Новиков, В.И. Окунев, В.Н. Ключкин</i>	70
УНЧ/КНЧ СИГНАЛЫ В ИОНОСФЕРЕ ВЫШЕ МАКСИМУМА ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГРОЗОВАЯ АКТИВНОСТЬ <i>Н.С. Носикова, Н.В. Ягова, В.А. Пилипенко и др.</i>	71
ПРИРОДА МАССОВОГО РАЗРЫВООБРАЗОВАНИЯ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВИЗАЦИИ В ЦЕНТРАЛЬНОМ КУЗБАССЕ <i>А.Н. Овсяченко, Е.А. Рогожин, А.С. Ларьков</i>	71
ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОМЕХ (на примере данных сейсмической станции «Дивногорье» Воронежской региональной сети) <i>Р.А. Орлов, С.П. Пивоваров, Э.В. Калинина, И.А. Сизаск</i>	72
МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОД ЗОНЫ ИНТЕНСИВНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИМОРСКОГО РАЗЛОМА БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ <i>А.А. Остапчук, Э.М. Горбунова, В.В. Ружич и др.</i>	73
ПРОЯВЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОСТИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕГИОНАЛЬНОГО РАЗЛОМА <i>Д.В. Павлов, В.И. Куликов, В.К. Марков и др.</i>	73
ЭВОЛЮЦИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В РАЙОНЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СКВАЖИНЫ Г-1 ПРИ ПОДГОТОВКЕ И РЕАЛИЗАЦИИ БЛИЗКОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО СОБЫТИЯ: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ <i>И.А. Пантелеев, Е.В. Полтавцева, В.А. Гаврилов</i>	74
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА <i>Д.А. Пестов</i>	74
РОЛЬ СЕЙСМОДЕФОРМАЦИЙ В ГИДРОТЕРМАЛЬНОМ РУДООБРАЗОВАНИИ <i>В.А. Петров</i>	75
НЕКОТОРЫЕ МОМЕНТЫ РЕАКЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ (на примере мониторинговых исследований в г. Кривой Рог, Украина) <i>П.И. Пигулевский</i>	75
ПРОЯВЛЕНИЕ ПРЕДШЕСТВУЮЩЕЙ СЕЙСМОАКТИВНОСТИ И ЗАТИШИЙ ДЛЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЕ <i>Е.И. Пономарёва</i>	76
ПРИЗНАКИ МЕТАСТАБИЛЬНОСТИ КОРЫ ПРИ ПОДГОТОВКЕ К КАТАСТРОФИЧЕСКОМУ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЮ - ОСОБЕННОСТИ ПОЛЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ <i>Ю.Л. Ребецкий</i>	77
ИСТОЧНИК ТЕКТОНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ЛИТОСФЕРЫ – КОНВЕКЦИЯ В МАНТИИ ИЛИ ПРОЦЕССЫ В ЯДРЕ ЗЕМЛИ ? <i>Ю.Л. Ребецкий</i>	78
ПРОГРАММА ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ПРУЖИННО – БЛОЧНЫХ УСТАНОВКАХ (СЛАЙДЕРАХ) <i>В.Ю. Рикман</i>	80
ВСПЛЕСКИ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЛИТОСФЕРЫ – СЕЙСМИЧЕСКИЕ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА <i>М.В. Родкин, А.В. Жариков, Е.Б. Лебедев</i>	80
ГЛУБИННЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В РАЗЛОМАХ ЗЕМНОЙ КОРЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ <i>В.В. Ружич</i>	81

О ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ	
<i>В.В. Ружич, Е.Е. Левина</i>	81
ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ ИСТОЧНИКОВ ИНФРАЗВУКОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПО СПЕКТРУ КОЛЕБАНИЙ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ	
<i>Ю.С. Рыбнов, А.А. Спивак, В.А. Харламов</i>	82
ОСОБЕННОСТИ МАГНИТОВАРИАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ГФО «МИХНЕВО»	
<i>С.А. Рябова</i>	83
ЭВОЛЮЦИЯ ТРЕЩИН ПРИ СДВИГОВОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА УСТАНОВКЕ СЛАЙДЕР-МОДЕЛИ	
<i>Н.В. Салтыков, А.А. Остапчук</i>	84
ПРИЛИВНЫЕ ЭФФЕКТЫ В СЕЙСМИЧЕСКИХ ШУМАХ В ШИРОКОЙ ПОЛОСЕ ЧАСТОТ	
<i>В.А. Салтыков, А.С. Черепанцев</i>	84
АНАЛИЗ ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНЫХ УСЛОВИЙ РАЙОНА МАРИУПОЛЬСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ	
<i>И.А. Санина, Г.Н. Иванченко, Э.М. Горбунова</i>	85
ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ЭНДОГЕННЫХ РУДОГЕНЕРИРУЮЩИХ-РУДООБРАЗУЮЩИХ СИСТЕМАХ НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА	
<i>Ю.Г. Сафонов</i>	86
СОВРЕМЕННЫЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ДВИЖЕНИЯ В РАЙОНАХ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ ОЧАГОВ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ	
<i>А.Д. Сашурин, А.А. Панжин</i>	87
РАДОН В ОБВОДНЕННЫХ РАЗЛОМНЫХ ЗОНАХ БАЙКАЛЬСКОГО РЕГИОНА: УРОВНИ СОДЕРЖАНИЙ И ИХ ВАРИАЦИИ В ПРОСТРАНСТВЕ И ВРЕМЕНИ	
<i>К.Ж. Семинский, А.К. Семинский</i>	88
СМЕНА ВРЕМЕН ГОДА КАК ВОЗМОЖНЫЙ ТРИГГЕР ВОЗНИКНОВЕНИЯ СИЛЬНЫХ ($M \geq 6$) ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ОЦЕНКА ЕЕ СЕЙСМОПРОГНОСТИЧЕСКОЙ ЗНАЧИМОСТИ (на примере Курило-Камчатского региона)	
<i>Ю.К. Серафимова</i>	88
МОНИТОРИНГ НАВЕДЁННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЙОНАХ ПРОВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАЛОАПЕРТУРНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ АНТЕНН	
<i>С.И. Сергеев, И.А. Санина, С.А. Королёв и др.</i>	89
РЕЗОНАНСЫ ГРАВИТАЦИОННЫХ ПРИЛИВОВ – ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТРИГГЕРЫ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	
<i>В.Г. Сибгатулин, А.А. Кабанов</i>	90
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ХИБИНСКОГО И КОВДОРСКОГО МАССИВОВ	
<i>Л.А. Сим, А.В. Маринин, Д.В. Жиров</i>	91
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАРНЫХ ВОЛН С МОЛЕКУЛЯРНЫМИ ОБЛАКАМИ – ЗАПУСКАЮЩИЙ МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ЗВЕЗД И ПЛАНЕТНЫХ СИСТЕМ	
<i>Н.Н. Смирнов, Б.П. Рыбакин, Л.И. Стамов</i>	91
ИЗУЧЕНИЕ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ СВОЙСТВ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ СРЕДЫ С ВЫХОДОМ НА АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ЗАРОЖДЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ПРИРОДНЫХ КАТАСТРОФ	
<i>А.Л. Собисевич, Л.Е. Собисевич, К.Х. Канониди</i>	92
О МОНИТОРИНГЕ НА ШУМАХ НЕОДНОРОДНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР	
<i>Л.Е. Собисевич, А.Л. Собисевич, Д.А. Преснов и др.</i>	93
МИГРАЦИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ПОСЛЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ	
<i>Г.А. Соболев</i>	93
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ КАЗАХСТАНА, СВЯЗАННЫЕ С ТЕХНОГЕННЫМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ	
<i>И.Н. Соколова, Н.Н. Михайлова</i>	93
ГЕНЕРАЦИЯ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ БРИЗОВО-ДОЛИННОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ В СИСТЕМЕ о. БАЙКАЛ-ТУНКИНСКАЯ ДОЛИНА	
<i>А.В. Соловьев, Ю.С. Рыбнов</i>	93

ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ, ВЫЗВАННЫЕ СЕЙСМИЧЕСКИМИ КОЛЕБАНИЯМИ	
<i>А.А. Спивак, Д.Н. Локтев, С.А. Рябова, С.П. Соловьев</i>	94
МИКРОПУЛЬСАЦИИ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ И ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИ СИЛЬНОЙ ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ	
<i>А.А. Спивак, Ю.С. Рыбнов, С.П. Соловьев, В.А. Харламов</i>	95
ОТРИГГЕРАХ И МЕХАНИЗМЕ ОКЕАНСКОГО РИФТОГЕНЕЗА	
<i>С.Б. Стажевский</i>	95
ДЕФОРМАЦИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВЫБУРИВАНИИ И ИСПЫТАНИЯХ КЕРНА	
<i>Ю.П. Стефанов, А.С. Романов, А.В. Мясников</i>	96
ЭМАНАЦИЯ РАДОНА КАК ИНДИКАТОР РАБОТЫ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ И ПРИЛИВНЫХ СИЛ	
<i>М.В. Сухоруков</i>	96
ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ФРОНТА ГОРЕНИЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫМИ УГЛЕВОДОРОДАМИ	
<i>А.А. Таирова, Г.В. Беляков</i>	97
СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ И СЕЙСМИЧНОСТЬ ЗЕМЛИ	
<i>Н.Т. Тарасов</i>	97
СТРАТЕГИЯ ОЦЕНКИ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ РЕГИОНА И ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ	
<i>Н.М. Торгаев</i>	98
ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ В ЛАБОРАТОРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ ПО ГИДРОРАЗРЫВУ ПЛАСТА	
<i>М.А. Тримонова, Н.А. Барышников, Е.В. Зенченко и др.</i>	98
ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ПОРОДНОГО МАССИВА	
<i>В.А. Трофимов, Т.Г. Макеева, Ю.А. Филиппов</i>	99
НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ ВЛИЯНИЯ РОСТА ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ НА СЕЙСМИЧНОСТЬ	
<i>С.Б. Турунтаев, В.Ю. Рига, А.Е. Губанова</i>	100
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ	
<i>В.Н. Уваров</i>	101
ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ СВОЙСТВ И СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ	
<i>Л.Л. Федорова, Д.В. Саввин</i>	101
ВЛИЯНИЕ АКТИВНЫХ РАЗЛОМОВ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ НЕОДНОРОДНЫХ МАССИВОВ СКАЛЬНЫХ ПОРОД	
<i>Ю.В. Федотова, Э.В. Каспарьян, Н.Н. Кузнецов</i>	102
ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ГОРНОСКЛАДЧАТЫХ ОБЛАСТЕЙ И ИХ ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ	
<i>И.С. Фельдман</i>	102
УЧЁТ ИЕРАРХИЧНОЙ ГЕТЕРОГЕННОСТИ ГОРНОГО МАССИВА ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ШАХТНОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ	
<i>О.А. Хачай</i>	103
ФЛЮИДОДИНАМИКА МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД В ИЕРАРХИЧЕСКИХ АНОМАЛЬНО ПЛОТНОСТНЫХ, НАПРЯЖЕННЫХ, ПЛАСТИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЯХ	
<i>О.А. Хачай, А.Ю. Хачай</i>	104
ВОЗМОЖНЫЙ ХАРАКТЕР ПЛАНЕТАРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛЫ ЛОРЕНЦА ПРИ ДВИЖЕНИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЗЕМНОЙ КОРЕ	
<i>Г.Я. Хачикян</i>	105
ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРЕРЫВИСТЫХ СКОЛЬЖЕНИЙ НА КОНТАКТАХ БЛОКОВ ПРИ МЯГКОМ НАГРУЖЕНИИ	
<i>А.И. Чанышев, И.М. Абдулин</i>	105
РАЗЛОМНЫЕ ЗОНЫ ЦЕНТРАЛЬНОГО ПРИБАЙКАЛЯ:	

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ <i>А.В. Черемных</i>	106
АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ГЛУБИННЫХ ЗОН ЛИТОСФЕРЫ ЯПОНСКОГО МОРЯ И ИХ СВЯЗЬ С СЕЙСМИЧНОСТЬЮ РЕГИОНА <i>А.Г. Черников</i>	107
ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОГО МАССИВА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭНТРОПИЙНОГО АНАЛИЗА ИЗМЕРЯЕМЫХ ХАРАКТЕРИСТИК <i>А.Г. Черников, Е.В. Федоров, Н.В. Либина</i>	108
ПРОБЛЕМЫ 3D ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГИБОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ <i>А.Н. Четырбоцкий</i>	108
О ПРИРОДЕ СЕЙСМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССА ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ <i>Е.Б. Чирков</i>	109
О ВОЗМОЖНОСТИ МОНИТОРИНГА ВАРИАЦИЙ ЛОКАЛЬНОЙ НДС НА ОСНОВЕ НАБЛЮДЕНИЙ КАЖУЩЕГОСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В ВОДОНАСЫЩЕННОЙ СКВАЖИНЕ <i>Е.Б. Чирков, И.Ш. Идармачев</i>	109
РОЛЬ ПРИЛИВНЫХ СИЛ КАК ТРИГГЕРА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, КЛАСТЕРИЗИРОВАННЫХ ПО ШИРОТАМ <i>Д.Л. Чубаров</i>	110
СИЛЬНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ: ЛОКАЛИЗАЦИЯ, ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ОЧАГОВ <i>С.И. Шерман, Е.А. Горбунова</i>	110
ЕДИНЫЙ МЕХАНИЗМ ДИНАМИЧЕСКИХ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ <i>А.В. Шестопалов</i>	111
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ РАЗРЫВА ПО РАЗЛОМУ ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ <i>М.И. Шимелевич, Е.А. Оборнев, И.С. Фельдман, В.А. Новиков</i>	112
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЕДИНОЙ МОДЕЛИ КОРОВОГО, ПРОМЕЖУТОЧНОГО, ГЛУБОКОФОКУСНОГО И МЕДЛЕННОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ <i>С.А. Шопин, А.А. Протопопов, Л.Н. Дода и др.</i>	112
АМПЛИТУДЫ И ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ МАСШТАБЫ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПРОИЗВОДНЫХ ПО ВРЕМЕНИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ <i>Н.В. Ягова, В.А. Пилипенко, О.В. Козырева и др.</i>	113
МОНИТОРИНГ СЛАБОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ БАСЕЙНА КУРСКОЙ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ <i>А.Н. Беседина</i>	113
ИОНОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ МАГНИТНОЙ БУРИ «ST. PATRICK'S DAY» 17 МАРТА 2015 г. <i>Б.Г. Гаврилов, Ю.И. Зецер, В.М. Ермак, А.Н. Ляхов, Ю.В. Поклад, И.А. Ряховский</i>	114
ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РЕГИОНА РАСПОЛОЖЕНИЯ РОСТОВСКОЙ АЭС <i>Г.Н. Иванченко, С.Б. Кишкина, Д.Н. Локтев</i>	114
ИНФРАЗВУКОВЫЕ СИГНАЛЫ ОТ РУМЫНСКОГО БОЛИДА <i>О.П. Попова¹, Ю.С. Рыбнов¹, В.А. Харламов¹, Е.Д. Подобная¹, D. Chica², J. Borovicka³</i>	115

MECHANISM UNDERLYING DEPENDENCE OF VISCOSITY OF ROCK BLOCK CONTACT INTERFACE ON SLIDING VELOCITY

Qi Chengzhi¹, Ban Liren², G.GKocharyan³

¹ - Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; E-mail: qichengzhi65@163.com)

² - China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

³ - Institute of Dynamics of Geosphere, RAS, Moscow, 119334, Russia

Solid friction is a longstanding fundamental scientific problem on which in the last several decades more attentions have been focused because of the studies of seismic fault dynamics. A very important progress in its phenomenological modeling, for macroscopic solids, was the formulation of the so-called rate and state constitutive laws, which emerged in the 1970s from the work on rock friction of Dieterich, Rice and Ruina. Laboratory and field experiments have been carried out by Kocharyan et al to study the formation of different deformation modes of rock discontinuities under laboratory and field conditions for several types of discontinuities, such as rigid surfaces contacts and cracks filled with quartz sand, talc, and clay. The transient deformation regimes were modeled by using the rate and state model. Numerical results showed that for reproduction of slow sliding signal it is necessary to introduce to the canonical equation of rate and state model one term related to the viscosity. By reaching the best correspondence between experimental data and numerical calculation the dependence of effective viscosity η on maximal sliding velocity V_{max} of rock blocks was obtained: $\eta = 235 \cdot V_{max}^{-0.97} \approx 235 \cdot V_{max}^{-0.1}$. This paper presents the preliminary research on mechanism underlying dependence of viscosity of rock block contact interface filled with granular material on sliding velocity. The viscosity η of rock block contact interface can be expressed as $\eta = Gt_r$, where G is the shear modulus of rock block contact interface material, t_r is the relaxation time of deformation. For contact interface filled with granular material under shearing condition, shear granular flow confined under normal stress $\bar{\sigma}_c$ between two rough planes is formed. The unique feature of granular material is that force is internally transmitted. The internal forces are not distributed evenly throughout the material, but are concentrated in "Force chain". The chain will form when particles are driven together at shear rate v and thus the chain production rate is proportional to v . The chain rotates at a rate $\sim v$ and eventually become unstable and self-destructs. Thus, the lifetime of the chain is proportional to $1/v$, thus, the relaxation time $t_r \sim 1/v = \delta/V$, where δ is the interface thickness. Thus, at slow sliding regime $\eta = 1/V$. At high sliding regime, the granular material will behave turbulently, and statistical physics can be used. The analytical result is that the viscosity η is inversely proportional to shear rate, i.e., $\eta \sim 1/v \sim 1/V$. Thus the mechanism underlying dependence of viscosity of rock block contact interface on sliding velocity is clarified.

О ВЛИЯНИИ ТРИГГЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ СЛАБЫХ ВИБРАЦИЙ В МАССИВЕ ПОРОД НА СОСТОЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНО ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Н.Н. Абрамов, Е.В. Кабеев

Федеральное государственное учреждение науки Горный институт КНЦ РАН, Апатиты

e-mail: abramov@goi.kolasc.net.ru

Изменение устойчивости подземных сооружений в процессе их длительной эксплуатации, как известно, связано с изменением напряженно-деформированного состояния массива во времени, обусловленного медленно протекающими природными процессами. Кроме того, как показывают результаты последних исследований, источники техногенных воздействий при длительной эксплуатации подземных сооружений, способны существенно изменять состояние приконтурного массива пород, снижая его устойчивость. Это может быть обусловлено инициированием триггерных эффектов в массиве, порождающих собственные воздействия по границам структурных блоков массива и его неоднородностей, что приводит к снижению физико-механических характеристик массива. Комплексная инструментальная оценка влияния природно-техногенных факторов на геомеханическое состояние массива выполняется в подземных сооружениях Верхне-Тулумской ГЭС (Кольский полуостров, РФ) включала:

- ▲ контроль техногенных вибровоздействий в различных точках массива;
- ▲ долгосрочный деформационный контроль по структурным нарушениям и конвергенций стен выработок;
- ▲ сейсмотомографический мониторинг состояния массива на различных его участках.

Результаты контроля вибраций по стенам машинного зала показали наличие резонансных частотных пиков на частотах, определяющих собственные частоты колебаний отдельностей массива. Многолетний деформационный контроль выявил направление устойчивого положительного тренда деформаций, а сейсмотомографический контроль участков массива в ближней и дальней зонах влияния вибронагрузок по скорос-

тям V_p позволил установить степень различия физико-механических свойств (модуля упругости и коэффициента Пуассона) вмещающих пород массива.

В результате выполненных геофизических исследований, установлено, что в зоне влияния динамических вибронгрузок и триггерных эффектов, массив пород проявляет себя как дискретная среда, испытывающая колебания в диапазоне частот близком к частотам собственных колебаний отдельностей массива. Длительное воздействие этих нагрузок на массив, усиливает и ускоряет влияние естественных процессов выветривания, способствует ослаблению межблоковых связей массива и оказывает негативное влияние на устойчивость приконтурного массива подземных сооружений.

ДИНАМИКА ЭНЕРГООБМЕННОГО ПРОЦЕССА В ИНТЕРВАЛЕ "ВРЕМЕННОЙ ЗАДЕРЖКИ ΔT ", ВЫЗВАННОГО ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СНИЖЕНИЯ РИСКА МАКРОРАЗРУШЕНИЯ

А.А.Авагимов, В.А.Зейгарник, В.И.Окунев

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

Исследования динамики энергообменного процесса неоднородной среды при известном энерговоздействии остаются востребованными в плане решения задачи уменьшения риска макроразрушения. Энергообменный процесс в интервале статистически установленной "временной задержки ΔT " отражает взаимодействие составляющих энергообменного процесса с геосредой от момента инициирующего воздействия упругим полем до вызванного сейсмического события. В работе [Авагимов и др., 2011] **количественно оценены пороговые уровни инициирующего энерговоздействия - $K_{tl}(k_p)$** относительно текущего процесса релаксации (k_p - функция отношения уровней текущей нагрузки к разрушающей). Показано, что при воздействии с энергией электромагнитного (ЭМ) поля ниже порогового уровня возможна разрядка локальных, структурных напряжений и уменьшение риска макроразрушения. Отметим, что упругое поле воздействия имеет близкий к сферический фронт распространения, и потому, как правило, не эффективно применительно в данной задаче. Необходимо получить локальный эффект от воздействия, что приведет к перераспределению общей напряженности и соответствующему понижению структурных напряжений. Излучаемое ЭМ поле в подобных экспериментах, как правило, поле заземленного диполя, концентрируется в зонах геоэлектрических неоднородностей высокой проводимости (преимущественно разломных зон), что принципиально повышает его энергоэффективность.

В докладе рассматриваются изменения интенсивности релаксации - $K_{ir}(k_p)$ и пороговых уровней инициирующего воздействия ЭМ полем - $K_{tl}(k_p)$. Показано, что по мере развития механической неустойчивости (увеличения нагрузки) уменьшается пороговый уровень - $K_{tl}(k_p)$ и растет интенсивность релаксации - $K_{ir}(k_p)$. Известно, что интенсивность процесса релаксации проявляется не только «в снятии упругих деформаций, фиксированных структурой геосреды» [Пономарев, 2008], но и в их увеличении, что позволяет внешним воздействием корректировать уровень внутренней энергии структурированной геосреды. Таким образом, установленное распределение релаксации $K_{ir}(k_p)$ указывает на обоснованную возможность применения внешнего воздействия ЭМ полем для управления уровнем структурных напряжений. В докладе рассматривается методический аспект по интерпретации полученных данных о триггерном механизме инициирования землетрясений. В интервале "временной задержки ΔT " реализуются два акта инициирующего воздействия при известном количественном уровне энергии воздействия. В начале интервала, когда индуцируется упругое поле от воздействия ЭМ полем, и в конце его - перед вызванным сейсмическим событием. В обоих случаях правомерен вывод о триггерном механизме инициирования.

ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ЭМИССИИ МЕТАНА В ПОЛЯРНОЙ ЗОНЕ

В. В. Адушкин, В. П. Кудрявцев

Институт динамики геосфер РАН, Москва

Известно, что прирост концентрации метана в атмосфере ежегодно составляет 0,3-1,2%. Существует мнение, что этот прирост ассоциирован с деятельностью человека. Однако антропогенная эмиссия метана не объясняет, почему максимум CH_4 в атмосфере существует не над умеренными широтами а над Арктикой, где антропогенная активность относительно невелика. За счёт каких источников наблюдается значительное увеличение потока и массы метана в атмосфере Северного полушария в осенне-зимний период. Проблема современного изменения климата до сих пор еще часто рассматривается только как проблема прямого антропогенного влияния. Однако более половины источников метана определяются различными природными механизмами. Многие из этих меха-

низмов имеют положительную зависимость от температуры. Как известно, потепление Арктики происходит примерно в два раза быстрее, чем рост глобальной температуры. Этот факт может быть причиной повышения эмиссии в полярной зоне, которая обусловлена положительной обратной связью между процессами потепления и эмиссией метана в полярной зоне.

Проведенный нами анализ наземных, морских и спутниковых измерений потоков метана в Арктике показал, что увеличение эмиссии метана из таких резервуаров захороненного метана, как метановые газогидраты, зоны вечной мерзлоты, северных болота может заметно превысить мощность антропогенных источников. При этом вклад парникового эффекта от работы положительных обратных связей может оказаться сравнимым или даже превысить антропогенный вклад в арктической зоне. Выполненные модельные расчеты показали, что изменения концентраций метана, воды, гидроксидов и озона в условиях повышения эмиссии метана от природных источников приводят к возникновению положительной обратной связи с потеплением в районе выбросов. Таким образом, включение при повышении температуры механизмов по высвобождению метана из естественных резервуаров приводит к еще большему накоплению метана в атмосфере и большему потеплению. При этом увеличение эмиссии антропогенных источников нужно рассматривать как своеобразный спусковой крючок, который запускает значительно более мощные процессы.

ПРИЛИВНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЯХ И АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

В.В. Адушкин, А.А. Спивак, Ю.С. Рыбнов, С.А. Рябова, В.А. Харламов

Институт динамики геосфер РАН, Москва

spivak@idg.chph.ras.ru

Гравитационное взаимодействие в системе Земля-Луна-Солнце является одним из основных факторов, который не только определяет ритмы и направленность, но в известном смысле является триггером ряда геофизических процессов. Сложности, связанные с изучением атмосферного прилива и приливных эффектов в геомагнитном поле на основе анализа результатов регистрации атмосферного давления и магнитного поля Земли хорошо известны и связаны с сильными возмущениями атмосферы (циклоны, антициклоны) и магнитного поля Земли (магнитные бури и суббури), на фоне которых приливная составляющая вариаций весьма мала. Даже при использовании длинных рядов данных удается выделить лишь малую часть приливных волн. В настоящей работе для выделения приливных волн в атмосфере и геомагнитном поле применен новый прием, основанный на анализе микропульсаций атмосферного давления и высокочастотных вариаций модуля полного вектора магнитного поля Земли. Оценка спектров исследуемых цифровых рядов данных выполнялась на основе метода параметрической авторегрессии. С целью повышения уровня дискриминации близких по периодам приливных волн в дополнение к параметрическому спектральному анализу в настоящей работе применялся также метод выделения гармонических составляющих с помощью узкополосных адаптивных режекторных фильтров.

В результате анализа данных выделены практически все известные приливные волны в атмосфере и в геомагнитных вариациях. Новизна и значимость полученного фундаментального результата заключается не только в инструментальной регистрации атмосферного прилива и приливных составляющих в геомагнитных вариациях, но, что особенно важно, свидетельствует о влиянии приливных сил на процессы, происходящие в земной атмосфере, а также на процессы, связанные с генерацией главного магнитного поля Земли. Результаты настоящей работы, по нашему мнению, могут быть востребованы при построении общей модели атмосферы Земли и установлении основных закономерностей атмосферных движений. Анализ приливной составляющей в вариациях магнитного поля Земли и ее изменений со временем создает основу для уточнения и разработки новых моделей движений динамически подвижных внутреннего и внешнего ядра Земли. Одновременно с этим полученные результаты могут оказаться полезными при оценках вязкости и ее радиальных градиентов в жидком ядре Земли, что представляет значительный интерес при определении параметров происходящих в нем турбулентных конвективных движений.

ЭФФЕКТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН С ТУРБУЛЕНТНЫМ ВЕТРОВЫМ ШУМОМ

В.В. Адушкин, Ю.С. Рыбнов, А.А. Спивак, В.А. Харламов

Институт динамики геосфер РАН, Москва

Анализируются результаты инструментальных наблюдений за инфранизкочастотными колебаниями атмосферного давления (акустические измерения), выполненных в условиях Геофизической обсерватории "Михнево" ИДГ РАН (54.9595°N; 37.7664°E) в период с 2008 по 2015 гг. Измерения в полосе частот 10^{-4} –10 Гц проводились с помощью микробарометра, установленного в скважину глубиной 2 м.

В связи с конструктивной спецификой микробарометрической аппаратуры микробарометр регистрируют суперпозицию колебаний атмосферного давления, вызванных источниками природного и техногенного происхождения, и одновременно шумовую составляющую, обусловленную ветровой турбулентностью. Колебания атмосферного давления от источников природного и техногенного происхождения имеют волновую природу и распространяются в атмосфере со звуковой скоростью, формируя акустико-гравитационные волны (АГВ). Ветровые шумы обусловлены пульсациями давления в нестационарных воздушных потоках различного пространственного масштаба. Данные, получаемые с помощью микробарометра не позволяют разделить указанные источники, хотя их природа существенно различна. АГВ - это малые изменения состояния среды, связанные с ее сжимаемостью и распространяются со скоростью звука. При пульсациях давления в нестационарном потоке, сжимаемость играет второстепенную роль и среду допустимо рассматривать как несжимаемую. В связи с этим скорость их распространения не зависит от скорости звука и равна средней скорости потока. Другое отличие заключается в том, что к АГВ как линейным колебаниям среды допустимо применять принцип суперпозиции. Напротив, пульсации скорости и давления в нестационарном турбулентном потоке, представляют собой существенно нелинейные явления. Область их проявлений (существования) является нелинейной средой, в которой не выполняется принцип суперпозиции: отклик на сумму возмущений не равен сумме откликов на отдельные возмущения. Кроме того, отклик на внешнее возмущение нелинейно зависит от амплитуды возмущения. Это приводит к таким эффектам, как генерация гармоник, сложение и вычитание частот (модуляция) и т. д.

Выполненные в настоящей работе исследования отклика ветрового турбулентного шума на лунно-солнечные приливы позволили установить, что суточные и полусуточные гармоники вариаций атмосферного давления сопровождаются боковыми равноудаленными спектральными линиями, что является прямым указанием на модуляцию указанных спектральных составляющих. На основе теоретических оценок и экспериментальных данных рассмотрен эффект взаимодействия АГВ с турбулентным ветровым шумом. Такая постановка задачи представляет собой аналог задачи о модулировании высокочастотного сейсмического шума приливными возмущениями земной коры.

СОПОСТАВЛЕНИЕ GPS-ДАННЫХ С РЕЗУЛЬТАТАМИ РЕКОНСТРУКЦИИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КОРЫ ВЫСОКОЙ АЗИИ ПО ДАННЫМ О МЕХАНИЗМАХ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Р.С. Алексеев

ИФЗ РАН

rs.alekseev@physics.msu.ru

На основе измерений GPS станций, расположенных вокруг Тибета, было показано [Weijun Gan et al., 2007; Jian Wang, 2008], что движение плато относительно устойчивой Евразии можно разбить на две составляющие: 1) по часовой стрелке (жесткое вращение всего плато); 2) внутренняя деформация в пределах плато с характерными особенностями в северной и южной частях. В некоторых работах [Lidong Zhu, 2006] отмечаются области на северо-востоке Тибетского нагорья, где перемещение коры происходит строго на север, с постепенно снижающейся скоростью. Поле скоростей деформаций, рассчитанное из GPS-данных, неоднородно. Можно выделить Гималаи и область вдоль разлома Джинша (Jinsha), где преобладают высокие скорости деформаций. Также стоит отметить, что в областях северного и центрального Тибета скорость деформаций наименьшая [Weijun Gan et al., 2007]. В большинстве исследований авторы сходятся на том, что такие перемещения поверхности являются следствием коллизии Индийской плиты и Евразии [Lidong Zhu, 2006; Zhang et al., 2002]. Реконструкция напряженного состояния методом катакластического анализа разрывных смещений (МКА), разработанный в лаборатории тектонофизики ИФЗ РАН [Ребецкий, 2007], заключается в определении компонентов тензоров напряжений, приращений квазипластических деформаций и оценке механических свойств, что позволяет дополнить картину о строении коры данного региона.

Для реконструкции параметров современного поля напряжений земной коры и верхней мантии в районе исследований использовался каталог механизмов очагов землетрясений, созданный для области 5-100° ВД и 20-45° СШ, по данным глобального сейсмологического каталога, геологической службой США (<http://earthquake.usgs.gov>). Сформированный региональный каталог механизмов насчитывал 1525 событий с диапазоном магнитуд $4.5 < M_b < 8$, за период времени 1976–2016 гг. Исследование этого региона было начато раньше и промежуточные результаты представлены в статье [Алексеев, Ребецкий, 2012; Ребецкий, Алексеев, 2014].

Реконструкция напряжений осуществлялась для масштаба осреднения, отвечающему коре в целом (50-70 км). Шаг сетки составлял 0.25 град. Расчеты выполнены для 576 квазиоднородных доменов при минимальном

числе землетрясений в однородной выборке б. Кора Тибета, где наиболее представлен режим горизонтального растяжения и горизонтального сдвига, окружена обширными участками коры с режимом горизонтального сжатия. Для всей коры Гималаев, отделяющей Тибет от Индийской плиты, наблюдается режим горизонтального сжатия. Большее по величине вертикальное сжатие в коре Тибета следует рассматривать как активное усилие, а напряжения, действующие в горизонтальном направлении, как реактивные силы. Эти горизонтальные реактивные силы должны уравниваться коровыми горизонтальными напряжениями со стороны Гималаев. Согласно данным современного напряженного состояния, горные области Гималаев выглядят как область выдавливания вверх коры между жесткой Индийской плитой и наваливающимися на нее с севера горных масс Тибетского плато.

УСТОЙЧИВЫЕ И ВЗРЫВНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ГЕОБЛОКОВ В СЕЙСМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ РАЗЛОМАХ

С.А. Арсеньев

ИФЗ РАН, Москва

Arrsenyev@yandex.ru

Теория фрикционных землетрясений и тектонического тремора в активных разломах, предложенная ранее [Арсеньев, 2014; 2015; 2016], обобщается на случай учёта гиперболического трения. Рассмотрены основные факторы, влияющие на межблоковое трение. Для его описания предложено использовать формулу Боше-Петрова, полученную на основе многочисленных экспериментов с тормозами железнодорожного, авиа и автомобильного транспорта. Показано, что эта формула адекватна и лабораторным экспериментам с образцами горных пород. Для математического описания колебаний блока в активном разломе выведено нелинейное дифференциальное уравнение, которое методом осреднения приведено к нелинейному уравнению 5-ой степени для амплитуды колебаний. Получены точные решения данного уравнения в квадратурах и проведен анализ решений с помощью теории сложных систем, синергетики и теории катастроф. Установлено, что поведение рассматриваемой динамической системы управляется параметром Co , который регулирует поступление энергии от внешнего источника в систему. Управляющий параметр Co определяется разностью двух чисел, $Co = Ti - Da$. Наклон характеристики трения Ti (от англ. **Tilt** – наклон) задается крутизной спада характеристики трения. Диссипация сейсмических колебаний Da (от англ. **Damper** - демпфер) определяется коэффициентом затухания колебаний h . Когда поступление энергии в систему превышает диссипативные потери, управляющий параметр Co положителен. При этом условии имеет место взрывная неустойчивость, описывающая землетрясение. Нейтральные автоколебания типа тектонического тремора возникают в случае $Co = 0$, однако они неустойчивы и легко трансформируются в землетрясение. При малых амплитудах α_0 таких колебаний время наступления катастрофы затянуто, величина t_c является большой. Однако, если имеется сильный начальный толчок α_0 , то время наступления катастрофы t_c мало, в разломе быстро возникают нарастающие колебания, вызывающие землетрясение. Особенно интересен случай *докритической неустойчивости*, когда управляющий параметр Co отрицателен. Тогда землетрясение возбуждается жестко, то есть для возникновения катастрофы начальная амплитуда α_0 должна превышать определенный порог α_c .

Эволюция сейсмически активного разлома в различных режимах исследована с помощью графиков зависимости амплитуды α от безразмерного времени τ , графиков зависимости потенциальной энергии системы U от управляющего параметра Co и бифуркационной диаграммы, показывающей зависимость стационарных кривых ($d\alpha/d\tau = 0$) от управляющего параметра Co . Доказано, что сейсмически активный разлом подобен *мультивибраторным* системам. Он имеет только одно состояние покоя, которое *метастабильно*, то есть устойчиво по отношению к слабым внешним воздействиям. Если начальное возмущение α_0 превысит пороговый уровень α_c , то в разломе возникнет вспышка активности в виде землетрясения. Оно разрушает разлом, который вновь возвращается к метастабильному состоянию.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ НЕОБРАТИМОЙ ДЕФОРМАЦИИ И АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ КАРСТА

Р.А. Бакеев^{1,2}, Ю.П. Стефанов^{1,2}, А.А. Дучков^{1,3}

¹ - ИНГГ СО РАН, Новосибирск

² - ИФПМ СО РАН, Томск

Работа посвящена исследованию процесса образования карстового провала в зависимости от геометрических факторов (глубины и размеров полости) и механических свойств среды, а также дополнительных воздействий малой амплитуды. Особенностью процесса является достаточно быстрое развитие необратимой деформации и трещин в среде, находившейся в упругом состоянии. Поэтому моделирование карстовой деформации в классичес-

кой постановке чаще всего не дает результата, так как величина напряжений вокруг полости не достигает критических значений, необходимых для выполнения критерия прочности, за исключением слабых грунтов. В таких условиях для развития необратимой деформации и разрушения среды требуется дополнительная нагрузка, либо иные факторы, оказывающие влияние на процесс.

В данной работе исследование процесса осуществляется с учетом кинетики накопления повреждений. Используется модель упруго-хрупкопластической деформации с предельной поверхностью Друккера-Прагера (Мизеса-Шлейхера), параметры которой зависят от функции накопления повреждений. Это позволило описать процессы развития деформации и разрушения в окрестности карстовой полости в первоначально упругой среде. Моделирование процессов выполнено для условий плоской деформации, путем численного решения системы уравнений механики конечно-разностным методом.

Было исследовано влияние глубины и размеров полости на развитие зон необратимой деформации и образование провала в зависимости от прочностных свойств среды. Рассмотрено влияние дополнительных воздействий в виде сейсмических волн на скорость развития процесса. Проведен анализ источников акустической эмиссии, связанных с процессами разрушения.

ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПОРИСТЫХ СРЕД ПРИ ОДНОФАЗНОЙ И ДВУХФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

В.Л. Барабанов

Институт проблем нефти и газа РАН, Москва; vlbarabanov@mail.ru

Электрокинетические явления в проницаемых пористых средах (к коим относятся и горные породы) издавна привлекали внимание специалистов по полевой и промысловой геофизике. Для полевых геофизиков - это, прежде всего, относится к задачам управления однофазными и многофазными фильтрационными потоками; для промысловых геофизиков - относится к задачам выделения нефтенасыщенных пластов по данным электрического или сейсмoeлектрического каротажа. Ключевыми параметрами электрокинетических явлений в горных породах являются параметры двойного электрического слоя на контакте минеральной фазы и насыщающего флюида. Этот слой, с одной стороны, определяет тип и степень смачиваемости минеральной фазы по отношению к насыщающему флюиду, с другой - степень подвижности флюида при его фильтрационном течении в поровых каналах. К основным параметрам двойного электрического слоя относятся: коэффициенты электроосмоса и потенциала течения; величина ζ -потенциала; характерная ширина немобильной части двойного электрического слоя, или так называемая длина Дебая. Ранее было показано [Барабанов, 2015], что указанные электрокинетические параметры можно получить в лабораторных экспериментах в режиме однофазной фильтрации водного раствора электролита через образцы песчаников. Величина ζ -потенциала составила -25 ± 2 мВ; величина коэффициента потенциала течения - $K_{\zeta} = (3.6 \pm 0.3) \cdot 10^{-8}$ м³/А·с или ~ 3.6 мВ/атм; величина коэффициента электроосмоса - $K_e = 74 \pm 6$ А·с/м³ (или Па/В) или ~ 0.074 атм/100 В. С учетом концентрации использованного в экспериментах водного раствора электролита NaCl ~ 0.13 моль/л оценка длины Дебая составила $\lambda_D \approx 0.815$ нм.

В последующей серии лабораторных экспериментов была проведена оценка электрокинетических коэффициентов в режиме стационарной двухфазной фильтрации смеси вода/керосин в соотношении 50:50. Один из самых главных и необычных результатов этой серии состоит в том, что зафиксирована четкая обратная зависимость между разностью градиентов порового давления при разном направлении электрического тока и общим перепадом давления на модели. Простейшая интерпретация этой зависимости такова: с ростом фильтрационного сопротивления величина электрокинетического коэффициента L снижается, причем со сменой знака.

Первый эффект - резкое снижение величины электрокинетического коэффициента Онзагера при замене режима от водонасыщенности к нефтенасыщенности является установленным экспериментальным фактом. В частности, согласно работе [Jiang, Shan, Jin, Zhou, Sheng, 1998], снижение величины электрокинетического коэффициента для песчаника, начально насыщенного водным раствором, а затем нефтью, может достигать трех порядков.

Второй эффект - смена знака электрокинетического коэффициента - также наблюдался в экспериментах, в частности, при изменении концентрации раствора электролита. Было отмечено, что с увеличением концентрации фонового электролита z -потенциал уменьшается вследствие сжатия диффузной зоны двойного электрического слоя. Как правило, при увеличении концентрации электролита z -потенциал по абсолютной величине сначала уменьшается и, проходя через ноль, возрастает до некоторого значения, после чего вновь убывает [Алтунина, Кувшинов, 1995].

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И ТРИГГЕРНЫЙ ЭФФЕКТ В РАЗРУШЕНИИ МАССИВА ПОРОД НА ШАХТЕ ХУАФЭН

А.С. Батугин¹, В.Н. Одинцев², Юй Лицзян³

¹ - МИСиС, Москва, as-bat@mail.ru

² - ИПКОН РАН, Москва

³ - Китайский геологический университет, Пекин

Представлены результаты натурных и теоретических исследований геодинамического состояния массива горных пород на угольной шахте, подверженной сильным горным ударам. В натурных исследованиях изучалось блочное строение шахтного поля, природные и техногенные трещины в подработанном массиве пород и взаимосвязь оседаний земной поверхности с горными ударами. Установлено, что под влиянием разработки наклонного угольного пласта на глубине 1 км на земной поверхности образуются протяженные открытые трещины с раскрытием 1-1,5 м и более и длиной несколько сот метров, и проникновением в подрабатываемый массив также на сотни метров [Цяо Цзаньюн, Батугин, Батугина и др., 2016]. Выявлена связь ориентации трещин с направлением фронта подземных добычных работ и природной крупноблочной нарушенностью массива. Установлено также, что скорость оседания земной поверхности связана с проявлением сильных горных ударов с энергией 10^6 и 10^7 Дж, при этом после горных ударов на отдельных участках шахтного поля наблюдается аномальный подъем земной поверхности.

С учетом натурных данных исследовался возможный механизм горных ударов и причины аномального сдвижения пород. С помощью геомеханической модели, основанной на МКЭ, и теории трещин Гриффитса-Ирвина исследованы закономерности зарождения и развития открытых трещин с дневной поверхности вглубь техногенной зоны растяжения в массиве пород. Показано, что глубина проникновения трещин, развивающихся в квазистатическом режиме, зависит от соотношения глубины горных работ и пролета нависающей части пород. Показано также, что по мере увеличения выработанного пространства часть открытых трещин должна закрываться, однако при определенных условиях неизбежно реализуется ситуация, когда одна из трещин отрыва провоцирует дальнейшее развитие разрушения массива от этой трещины в направлении выработанного пространства по механизму сдвига. Изменение характера разрушения массива (с отрывного на сдвиговой) можно охарактеризовать как триггерный эффект в разрушении, поскольку, как показало моделирование, в рассматриваемых техногенных условиях сдвиговое разрушение является неустойчивым и должно проявляться как динамическое событие. Для углубленного исследования этой ситуации использованы два подхода: в рамках классической теории трещин сдвига и теории Кулона-Мора со срывом сцепления. Оба подхода, в которых учитывалось трение на поверхности сдвига и дилатансионный эффект при сдвижении по неровному контакту, приводят к одинаковым результатам в отношении неустойчивости сдвигового разрушения.

В целом, как следует из проведенных исследований, сильный горный удар представляет собой вертикальное динамическое сдвижение под действием собственного веса подработанного крупного блока, заключающего в себе всю нависающую толщу пород по высоте и ограниченного по бокам техногенными и природными трещинами. Это динамическое сдвижение заканчивается жесткой «посадкой» блока на обрушенную породу в выработанном пространстве пласта. Разгрузкой и вертикальной упругой отдачей части массива, прилегающей к плоскости техногенного сдвига, можно объяснить наблюдаемый в натуре относительный подъем земной поверхности после проседания блока. Процесс последовательного формирования крупных блоков и их динамического сдвижения объясняет системное проявление горных ударов по мере отработки пласта. Проведенные натурные и теоретические исследования позволили лучше понять наблюдаемые геодинамические особенности разработки шахты Хуанфэн и составить прогнозную геодинамическую оценку ведения горных пород до глубин 1500 м.

УТОЧНЕНИЕ ИСХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТЕРМИНИРОВАННО-ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ D-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ И СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАДИОФИЗИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

С.З. Беккер

Институт динамики геосфер РАН, Москва

susanna.bekker@gmail.com

Необходимость использования статистического подхода для описания такой непрерывно изменяющейся среды как ионосфера, подробно описана в работе [Козлов, Ляхов, Беккер, 2014]. Там представлены первые грубые результаты, полученные по статистическим моделям ионосферы (на примере D-области), и их сопоставление с экспериментальными данными. Если принципы, на которых строится указанное направление моделирования, вопросов не вызывают, то сами результаты демонстрируют лишь качественное согласие с экспериментом. В работе [Беккер, Козлов, Ляхов, 2016] предложен ряд новых методов усовершенствования обсуждаемых моделей.

Стоит отметить, что наибольший вклад в точность расчета профилей электронной концентрации по детерминированно-вероятностной модели дают, разыгрываемые согласно их законам распределения, математическим ожиданиям и среднеквадратическим отклонениям, параметры ионизационно-рекомбинационного цикла. Цель настоящей работы – уточнение входных параметров модели на основании многолетних банков данных температуры T и концентраций компонент H_2O , CO_2 , NO , O_3 для лучшего согласия с экспериментом. Корректность любой геофизической модели ионосферы должна быть проверена по независимо полученным экспериментальным радиофизическим данным. Проведенное сопоставление на среднеширотной трассе с данными СДВ-приемника ГФО «Михнево» ИДГ РАН подтвердило необходимость дальнейшей работы по уточнению варьируемых параметров, вносящих существенный вклад в истинность значений электронной концентрации.

ИОНОСФЕРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ДО, ВО ВРЕМЯ И ПОСЛЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

А.Ю. Белинская, А.А. Ковалев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск; anbell@ngs.ru

На Геофизической обсерватории «Ключи» (ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск) ведутся комплексные геофизические наблюдения, в том числе и ионосферные. Используя результаты многолетнего мониторинга, были исследованы возможные эффекты землетрясений (в том числе и в период подготовки) на ионосферу. Рассмотрены землетрясения с магнитудой $M \geq 5$ и удаленностью эпицентра от обсерватории «Ключи» не более 1000 км в период с 2000 по 2013 года. Проанализированы вариации критической частоты и высоты слоя F2, а также появление спорадических слоев. Исследование проводилось с учетом геомагнитных условий. Для выявления эффекта дополнительно привлечены данные ионосферной станции в г. Томске, которая расположена гораздо дальше от эпицентров землетрясений. Для каждого землетрясения вычислялись средненежные значения $foF2$ и $h'F2$ для 10 дней до и 5 дней после. Затем эти значения нормализовались средним по всем 15 дням. Таким образом были получены ряды для каждой из станций $F_i = (foF2)_i / (foF2)_{total}$, где i – номер дня относительно дня землетрясения, $(foF2)_i$ – среднее значение $foF2$ за i -ый день, $(foF2)_{total}$ – среднее за 15 дней наблюдений; и аналогично для $h'F2$. Также для каждого землетрясения рассматривалось поведение $foEs$ и $h'Es$. Отдельного рассмотрения потребовал случай техногенно-землетрясения 18.06.2013 г. с эпицентром в менее, чем 300 км от Новосибирска.

Проведенный анализ показал неоднозначность выявленных вариаций. При этом хотелось бы отметить, что в комплексном анализе изменений окружающей среды в период подготовки сильных землетрясений учет ионосферных данных может дать более четкую картину этого стихийного бедствия.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДОНОВОЙ АКТИВНОСТИ РАЗЛОМОВ В ПРИБАЙКАЛЬЕ: К ПРОБЛЕМЕ ВЫБОРА МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ПУНКТОВ ЭМАНАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

А.А. Бобров¹, М. Билгуун²

¹ - ФГБУН Институт земной коры СО РАН, Иркутск, alexbob@crust.irk.ru

Исследования проводились в центральной части тектонически активного (сейсмичность, разломообразование) Байкальского рифта (Прибайкалье). В течение семи лет (с 2008 по 2014 гг.) над четырьмя разломными зонами проводились измерения объемной активности радона (ОАР). Замеры ОАР осуществлялись в летние месяцы в точках, образующих профили, поперечные по отношению к изучаемому разрывному нарушению. Расстояние между пикетами составляло 10 метров. Ежегодно замер повторялся несколько раз для каждой точки профиля.

Комплексный анализ графиков распределения амплитуд вариаций объемной активности радона и логарифма суммарной сейсмической энергии показал, что по характеру реакции поля радона на сейсмичность «чувствительные» в эманационном плане точки в разломных зонах можно разделить на 3 группы. Первая группа включает «чувствительные» точки, в которых характер вариаций графика поля радона из года в год практически идентичен графику логарифма суммарной сейсмической энергии. Во вторую – вошли точки, в которых характер поля радона имеет подобное распределение, но отличается от графика логарифма суммарной сейсмической энергией в отдельные годы. Третья группа характеризуется отсутствием связи радона с сейсмичностью. Благоприятным местом для расположения мониторинговых станций радона являются участки разломных зон с высокой степенью нарушенности горных пород, которые находятся вблизи наиболее крупных дизъюнктивов региона. В районе п. Бугульдейка для выявления благоприятного места установки мониторинговой станции радона вкострости Примоорского

сброса были проведены геолого-структурные, эманационные и электроразведочные исследования. Профиль длиной порядка 2,4 км позволил выявить наиболее перспективные точки. Они характеризуются повышенной проницаемостью для радона и на графике ОАР отмечаются в виде пиков параметра.

Авторы благодарны сотрудникам лаборатории тектонофизики Института земной коры СО РАН к.г.-м.н. А.В. Черемных, А.С. Черемных, А.К. Семинскому, Е.И. Когуту, Р.М. Зарипову и А.А. Тарасовой за помощь в сборе фактического материала. *Исследования проводились при частичной поддержке РФФИ-16-55-44017-Монг.*

НЕРАВНОМЕРНОСТЬ СУТОЧНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ КАК ПРОЯВЛЕНИЕ ТРИГГЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ

Л.М. Богомолов¹, Т.Е. Воронина², А.С. Закупин¹, П.А. Каменев¹, Н.А. Сычева³

¹ - Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, bogomolov@imgg.ru

² - Сахалинский филиал Единой Геофизической службы РАН

³ - Научная станция РАН, Бишкек, Киргизия

Неоднородность распределения сейсмических событий по времени суток с преобладанием ночной сейсмичности анализировалась в ряде работ, начиная с оригинальной публикации [Иванов-Холодный, Боярчук, Чертопруд, 2004]. Синхронизация суточных распределений со сменой светлого и темного времени суток (т.е. локальным временем), а не с фазой лунно-солнечных приливов свидетельствует о взаимосвязи с состоянием ионосферы. Для ионосферы хорошо известны значительные изменения параметров и возбуждение волн при переходе через солнечный терминатор [Сомсиков, 2011]. В докладе высказана гипотеза, что такие волны и связанные с ними градиенты давления – один из механизмов влияния ионосферы на сейсмический процесс. В докладе также детализируются и особенности суточных распределений сейсмичности на примере Сахалин-Курильского региона и Центральной Азии. Для анализа использован новый программный комплекс Seis-ASZ (автор А.С. Закупин). Показано, что неравномерность суточных распределений определяется вкладом событий наименьших энергий (но в пределах представительных классов). Для событий промежуточных классов неоднородность уменьшается или исчезает совсем. Этот результат нетривиален в сравнении со свойствами параметра модуляции сейсмичности лунно-солнечными приливами, LURR который может считаться одним из среднесрочных предвестников сильного землетрясения. Для параметра LURR отклонения от фона становятся больше при исключении из анализа наиболее слабых событий. Показано, что отношение числа событий в темное и светлое время суток эволюционируют со временем. Временная зависимость этого отношения отличается от параметра LURR. Для выявления корреляций между изменением соотношения “ночь-день” (смена синхронизации потока событий) и подготовкой сильного землетрясения оказалось недостаточно данных.

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМАХ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ В ГЕОМАТЕРИАЛАХ (теоретические аспекты)

Л.М. Богомолов¹, В.А. Мубассарова², А.С. Закупин¹

¹ - Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, bogomolov@imgg.ru

² - Научная станция РАН, Бишкек, Киргизия

Физические модели влияния электромагнитных (ЭМ) полей на неупругое деформирование и разрушение геоматериалов, пусть качественные, были известны с самого начала исследований по проблеме разрядки избыточных напряжений в геосреде, но в публикациях они оставались на втором плане. Эксперименты опережали “теорию”. В докладе обсуждаются некоторые модели, среди которых особое место занимает модель, связанная с сильной электрической поляризацией диэлектриков (горных пород) из-за высвобождения носителей заряда при трещинообразовании [Freund, Takeuchi, Lau, 2006]. На 3-ем семинаре-совещании “Триггерные эффекты в геосистемах” обсуждалась идея о взаимосвязи результатов Н.Т. Тарасова (активация сейсмичности после ЭМ-зондирования с применением МГД-генераторов) и Ф. Фройнда (у кончиков трещин материал становится полупроводником, а не изолятором). Однако переход от микроуровня к макро- и даже мегамасштабам оставался неясным. В докладе предложена следующая цепочка эффектов при возбуждении тока в среде с ионной проводимостью. 1). Вызванная поляризация при пропускании однополярных импульсов тока по каналам с флюидом; 2). Поляризация вещества у стенок каналов, возникновение областей объемного заряда (макроэффект органически связанный с результатами [Freund, Takeuchi, Lau, 2006]); 3). Расталкивание несобственных одноименных зарядов, их концентрация на границах зерен, блоков или поверхностях трещин; 4). Изменение вследствие этого условий неустойчивости Гриффитсовских трещин или трения на контактах; 5). Возникновение новых разрывов и/или подвижек. Другими

словами, расталкивание одноименных зарядов в области вызванной поляризации – сильный эффект, роль которого подобна смазке на контактах

Анализ нового и ранее предложенных механизмов, сравнение с экспериментальными данными подводит к выводу, что наблюдаемые вариации сейсмичности (как и активности акустической эмиссии образцов) на воздействие ЭМ полей объясняются скорее сочетанием нескольких механизмов.

ЭКЗОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И СЕЙСМИЧНОСТЬ

В.Н. Боков, С.В. Лебедев

Центр геофизических прогнозов «Градиент», Санкт-Петербург, viktor.bokov333@gmail.com

Блочная структура земной коры приводит к появлению дополнительных степеней свободы и подвижности, к реакции даже на очень слабые воздействия [Кочарян, Кулюкин, Павлов, 2006]. Анализ атмосферных преобразований (более 1500 случаев), предшествующих возникновению сильных землетрясений с $M > 6$, для различных сейсмоактивных регионов Северного полушария показал, что вокруг эпицентра землетрясения на расстоянии с радиусом около тысячи км наблюдаются закономерные изменения в атмосферных процессах [Боков, 2004; Сытинский, 1987]. Исследования показали, что деформация земной коры, где происходит основное количество разрушительных землетрясений, в большей мере происходит под влиянием колебаний, возникающих в земной коре при прохождении циклонов и антициклонов [Боков, Гутшабаш, Потиха, 2011; Сытинский, 1987; Трубицин, Макалкин, 1976]. Амплитуда этих колебаний сопоставима с приливными колебаниями, но в отличие от последних, атмосферные колебания имеют резкие изменения градиентов. Вместе с эндогенными процессами, обуславливающие постоянство вертикальных потоков газовых и водных флюидов [Гуфельд, Матвеева, Новоселов, 2011; Киссин, 2009], атмосферные колебания создают энергонасыщенную геологическую среду. Это приводит к появлению как слабых, умеренных, так и сильных землетрясений с дальнейшим сохранением энергонасыщенной среды.

В докладе представлены результаты исследований триггерного эффекта в иницировании землетрясений [Боков, 2004; Боков, Гутшабаш, Потиха, 2011] и на усиление геофизических предвестников землетрясений (геоакустические шумы, эмиссия радона, изменение уровня подземных вод, деформация и наклоны земной коры) [Боков, 2009; Боков, Воробьев, 2012; Боков, Воробьев, 2013; Гуфельд, Матвеева, Новоселов, 2011; Рикитаке, 1979]. Дано понятие атмосферно-циркуляционного предвестника [Боков, 2004]. Для создания эффективной и надежной методики краткосрочного прогноза землетрясений с оправдываемостью близкой к 100% требуется совместный анализ мониторинга среднесрочных, краткосрочных геофизических предвестников и оперативные изменения атмосферной циркуляции.

СТРУКТУРА ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ (РАЗЛОМНЫХ) ЗОН, СКОРОСТЬ ДЕФОРМАЦИИ И ИХ СВЯЗЬ С СЕЙСМИЧНОСТЬЮ

Е.Г. Бугаев¹, С.Б. Кишкина²

¹ - ФБУ "НТЦ ЯРБ", Москва, bugaev@secnrs.ru

² - Институт динамики геосфер РАН, Москва

Для оценки связи структуры земной коры, условий деформирования и характера разрушения с сейсмичностью принята модель, отражающая дискретную структуру земной коры, области подготовки и очаги землетрясений, как составные элементы земной коры, размеры которых неслучайным образом связаны друг с другом коэффициентом подобия k_n в виде: $L_i/L_{i-1} = k_n$ = корню квадратному из десяти, где i - порядок структуры изменяется от 1 до XVIII [Садовский, 1979]. Распределения магнитуд землетрясений и десятичных логарифмов размеров составных элементов земной коры описываются полулогарифмическими распределениями. Свойства геометрической прогрессии позволяет формализовать оценку размеров $\lg L_n$ составных элементов модели ранга n (n изменяется от 1 до 18) и количество режима активизированных элементов модели $\lg N_n$ ранга n и более вплоть максимального элемента ($n = 1$). Количество активизированных элементов модели, вовлекаемых в процесс деформирования, определяется знаменателем 3 геометрической прогрессии, величина которого зависит от типа модели и условий деформирования. При всестороннем деформировании в процесс вовлекаются практически все элементы плоской модели, для которой $Z_0 = k_n^2$. При одноосном деформировании в процесс вовлекается лишь элементы линейной модели, для которой $Z_0 = k_n$. Учет отношения упругого предела к скорости деформации G в год позволяет определить максимальный T_{\max} (лет), в течение которого на максимальном элементе модели L_1 накапливаются предельные напряжения, при достижении которых происходит разрушение. Периоды повторяемости разрушения составных элементов модели ранга n , определяется отношением T_{\max} к количеству составных элементов N_n ранга n и

более [Родионов, 1994]. Периоды повторяемости разрушений на структурах ранга n и более позволяют определить периоды повторяемости магнитуд с учетом их неслучайной зависимости от размера L_n структур ранга n и характера (хрупкое или хрупко-пластическое) разрушения, возможные пределы изменения максимальных магнитуд M_{\max} для разных периодов повторения землетрясений и оценить прогнозные пределы и прогнозные графики повторяемости магнитуд в зависимости от масштабности максимальной структуры района, условий деформирования и характера разрушения [Бугаев, 2011].

Достоверность оценки возможных пределов и прогнозных графиков повторяемости магнитуд сейсмоактивных областей и платформенных территорий на основе геодинамических и сейсмотектонических данных подтверждается тем, что они контролируют положение графиков повторяемости магнитуд, рассчитанных по инструментальным и историческим данным о землетрясениях, включая микроземлетрясения и палеоземлетрясения [Бугаев, 2014; Бугаев, Кишкина, 2015]. Сравнение прогнозных и наблюдаемых графиков повторяемости позволяет судить об условиях подготовки и проявления землетрясений в рассматриваемом районе и оценить возможное изменение параметров сейсмического режима при изменении упругих свойств и скорости деформации земной коры, определяющих изменение параметров текущего сейсмического режима на фоне параметров долговременного сейсмического режима.

БЕРДЯНСКОЕ (ОСИПЕНКОВСКОЕ), 2006 г., И МАРИУПОЛЬСКОЕ, 2016 г. ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В ЗОНЕ СЕВЕРО-АЗОВСКОГО РАЗЛОМА: МАКРОСЕЙСМИЧЕСКОЕ ПОЛЕ, МЕХАНИЗМ ОЧАГА, МИГРАЦИЯ

И.П. Габсатарова¹, А.А. Никонов², Л.Д. Флейфель²

¹ - Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба РАН», Обнинск; ira@gstras.ru

Северные районы Приазовья относятся к южной части Восточно-Европейской платформы. С учетом собранных ранее сведений об исторических землетрясениях в Северо-Азовской полосе и о возникших там в последние десятилетия слабых землетрясениях, включая ощутимое Бердянское (Осипенковское) землетрясение 31.07.2006 г с $M_w = 3.3$, была выделена Северо-Азовская сейсмогенная зона, зона ВОЗ с $M_{\max} = 5$ (на период в столетия). На основе исторических сообщений именно на северном берегу Таганрогского залива, но нигде к округности, определена полоса широтного протяжения с эпицентрами землетрясений интенсивностью IV÷IV-V баллов в XIX и XX вв. Полоса тянется от границы с Украиной к востоку и почти до г. Ростова, годы возникновения вдоль простирания разлома последовательно к востоку 1816, 1883, 1814, 1884, 1902, 1859. Выделяются два временных кластера: 1814-1816 гг. и 1859-1884 гг., и периоды без сейсмических возмущений. Помимо строго линейного, вдоль побережья и проходящего здесь под ним отрезка Северо-Азовского разлома, обращает внимание тот факт, что 10 мая 1814 г. колебания ощущались как в Таганроге, так и в Ростове, то есть ось макрополя на востоке вытягивалась широтно. Сейсмическая активность зоны подтвердилась в 2016 г., когда вблизи г. Мариуполя было зарегистрировано землетрясение с большей магнитудой ($M_w = 4.6$), чем Бердянское в 2006 г. Приазовье относится к зоне «неуверенного мониторинга»; наблюдения за заметной сейсмичностью ($M \geq 3$) проводятся станциями на Черноморском побережье, в Краснодарском крае, Крыму, Воронежском районе и на Украине. Ближайшие станции удалены от эпицентров на 200 км и более, что определяет неточность параметров гипоцентров.

Собранные макросейсмические сведения о Бердянском (Осипенковском) и о Мариупольском землетрясениях позволили составить схемы макросейсмического поля и определить глубины очагов в пределах $h = 6-10$ км. Для расчета взяты средние значения коэффициентов: $b = 1.5$, $c = 3.5$, $c = 3.0$, применимые к платформенным очагам. Для удаленной зоны землетрясения 2016 г. (100–450 км) коэффициенты уравнения макросейсмического поля уточнены: $b = 1.6$, $c = 3.5$, $c = 3.3$. Изосейсты землетрясений вытянуты в субширотном направлении. В том же направлении определена одна из плоскостей механизма очага. Последний определялся по тензору момента в Global CMT Catalog и одним из авторов по знакам первого движения в Р-волне на 33 сейсмических станциях с удалением от 2.3 до 45.3° и хорошим окружением эпицентра. Получены близкие решения, описывающие тип движения в очаге как подвижка по простиранию (strike-slip), левосторонний сдвиг по нодальной плоскости NP1, субмеридионального (Strike = 192°) простирания, правосторонний сдвиг – по NP2, субширотного (Strike = 101°) простирания. Обе плоскости имеют крутое падение ($DP_{NP1} = 75$ и 88° , $DP_{NP2} = 85$ и 75°).

Последнее сейсмическое оживление разлома в начале XXI в., с заведомо вытянутыми субширотными эпицентральными областями, со смещением к востоку происходит на том же его отрезке, который оживал в фазу середины конца XIX в. (1859-1884 гг.), но в обратном направлении. Это дает основание полагать, что нынешняя фаза активности, если она продолжится, может разрешиться значительным событием на востоке, непосредственно в районе г. Ростова, в течение нескольких десятков лет.

ВОЗМУЩЕНИЕ СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 20 МАРТА 2015 г.

Б.Г. Гаврилов, Ю.В. Поклад, И.А. Ряховский, В.М. Ермак

Институт динамики геосфер РАН, Москва; Ryakhovskiy88@yandex.ru

Геофизические эффекты, сопровождающие солнечные затмения, привлекают интерес исследователей, так как дают возможность изучать возникновение возмущений в ионосфере и атмосфере Земли при известных параметрах источника возмущений. Солнечные затмения вызывают изменение профиля электронной концентрации в ионосфере, генерацию акустогравитационных и других волновых возмущений. Наблюдению вариаций параметров ионосферы во время солнечных затмений с использованием радиофизических методов и спутниковых измерений посвящено значительное количество работ [Адушкин, Гаврилов, Горелый, Рыбнов, Харламов, 2007; Voitman, Kalikhman, Tashchilin, 1999; Rishbeth, 1968; Cohen, 1984]. Установленная в ГФО «Михнево» ИДГ РАН аппаратура, позволила провести системный анализ состояния среднеширотной ионосферы (D и F слоев) во время солнечного затмения 20 марта 2015 года. Мониторинг состояния D слоя проводился на основе вариаций амплитудно-фазовых параметров сигналов СДВ станций. Во время солнечного затмения в период с 9-11 UT наблюдались значительные вариации фаз принятых сигналов. Возмущение F слоя ионосферы оценивалось по измерению вариаций полного электронного содержания. Сопоставление данных, полученных различными методами в одном измерительном пункте, позволяет получить информацию о динамике ионосферных возмущений на различных высотах.

ВОЛНОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ПЛАСТ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ, ЗАПОЛНЕННОЙ СЖИМАЕМОЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТЬЮ

О.Р. Ганиев¹, А.В. Звягин², Л.Е. Украинский³

¹ - «Научный центр нелинейной волновой механики и технологии РАН» Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва; oleg62@inbox.ru

² - Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва; zvyagin.aleksandr2012@yandex.ru

³ - «Научный центр нелинейной волновой механики и технологии РАН» Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва; ukrainsky@nwmmtc.ac.ru

Волновое воздействие на различные среды является одной из актуальных современных технологических и фундаментальных проблем механики [Ганиев, Украинский, 2011]. Это связано с возможностью создания новых технологий, основой которых служат фундаментальные результаты динамики. Одной из востребованных задач данного направления является задача волнового воздействия на пласт деформируемой среды, насыщенной жидкостью. С волновых позиций пласт является волноводом с бесконечным набором собственных частот колебаний. Поскольку в реальной среде присутствует диссипация энергии, возможность закачки энергии вглубь пласта тесно связана с законами затухания волн разной частоты и длины. Основой волновых технологий является возможность «резонанса», который определяется свойствами среды, геометрией пласта и типом реализуемых граничных условий. В работах [Ганиев, Ганиев, Украинский, 2014; Ганиев, Ганиев, Звягин, Украинский, Устенко, 2016 (3); 2016 (4)] приведены результаты исследования динамической задачи волнового воздействия на ограниченный слой пористой среды, насыщенный сжимаемой вязкой жидкостью. В рамках модели двухфазной среды получено решение для стационарных колебаний пласта. Показана возможность резкого увеличения амплитуды колебаний и найдено значение соответствующей частоты колебаний для конкретных граничных условий. Показано, что в зависимости от параметров среды данное явление может быть как явным резонансом, когда при отсутствии вязкости амплитуды стремятся к бесконечности, так и псевдо «резонансом», когда амплитуды возрастают на порядки, но остаются конечными (условимся далее для краткости называть это явление «резонансом»). Установлено, что для всех параметров «резонанс» соответствует колебаниям скелета и жидкости в одной фазе. Наличие любого типа вязкости приводит к невозможности чистого резонанса, но «резонанс» в более широком толковании, как резкое увеличение амплитуды колебаний остаётся.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы: 1. Установлена возможность «резонанса», соответствующего первой моде колебаний. Показано, что вклад следующих мод колебаний мал. 2. Определены «резонансные» частоты колебаний. Они зависят не только от физических свойств материала, но и от конкретных граничных условий на границе пласта. Показано, что «резонансные» частоты дают возможность создавать значительные амплитуды на большом расстоянии от источника колебаний. 3. При «Резонансе» колебания жидкости и скелета происходят в одной фазе. Совпадение фаз позволяет искать «резонансную» частоту другими методами, как возможность колебаний в одной фазе.

БЫСТРЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ЗОНЕ РАЗЛОМА С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ МЕХАНИКИ СИСТЕМ С НЕСМЕЖНЫМИ ФОРМАМИ РАВНОВЕСИЯ

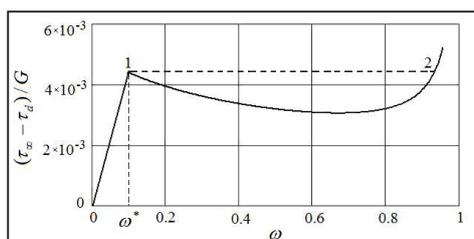
И.А. Гарагаш

ИФЗ РАН, Москва; garagash@mail.ru

Подготовка землетрясения и наступление сейсмического удара связано с изменением напряженно-деформированного состояния в зонах разломов. В пределах зоны разлома горные породы раздроблены и характеризуются повышенной трещиноватостью. Перемещения в зоне разлома контролируются силами сухого трения в соответствии с условием прочности Кулона-Мора. Превышение предела прочности приводит к тому, что сцепление и угол трения уменьшаются скачком до некоторого минимального значения и устанавливается новое равновесие на более низком уровне напряжений. Для того чтобы выяснить основные закономерности этого процесса рассмотрим упругий слой с разрезом длиной $2a$, нагруженный на бесконечности сдвигающими усилиями τ_∞ . Напряжения, действующие в зоне разлома перед разрушением, заменим распределенными силами взаимодействия бортов разреза. Будем считать, что они распределены равномерно и уменьшаются скачком от уровня τ_u до уровня остаточной прочности τ_d при критическом скачке смещения δ_c . Поэтому в наиболее нагруженной центральной части, где превышен скачок смещения δ_c , имеется область с шириной $2b$, где силы сухого трения равны τ_d , а вне этой зоны действует силы τ_u . Решение задачи позволяет связать разность напряжений $(\tau_u - \tau_d)$ с геометрией размером трещины a , отношением $\varpi = b/a$ и скачком напряжений $(\tau_u - \tau_d)$ при заданном значении δ_c соотношением

$$\frac{(\tau_u - \tau_d)}{G} = \frac{1}{2(1-\nu)\sqrt{1-\omega^2}} [\delta_c - 2\frac{(1-\nu)(\tau_u - \tau_d)}{\pi G} \omega \ln(\frac{1}{\omega^2})] + \frac{2}{\pi} \frac{(\tau_u - \tau_d)}{G} \arccos \omega \quad (1)$$

здесь G - модуль сдвига среды, ν - коэффициент Пуассона. Анализ выражения (1) показывает, что увеличение зоны с пониженной прочностью происходит в режиме самоподдерживающегося процесса.



На рисунке по формуле (1) при $G = 8 \cdot 10^9$ Па, $\tau_u = 5 \cdot 10^7$ Па, $\tau_d = 2 \cdot 10^7$ Па, $\nu = 0.3$, $\delta_c = 2 \cdot 10^{-3}$ построена кривая равновесных состояний разлома (сплошная черная линия). Любой из точек этой кривой соответствует некоторое состояние равновесия системы характеризуемое парой значений $(\tau_u - \tau_d)/G$ и ϖ . Рассмотрим теперь монотонный процесс нагружения от нуля до состояния характеризуемого точкой 1, соответствующего начальному значению ϖ^* после чего должен произойти перескок системы по пунктирной линии в точку 2. За точкой 2 увеличение ϖ будет уже происходить при возрастании нагрузки.

В момент перескока энергия в системе может выделяться динамически в виде сейсмических колебаний или приводить к медленным скольжениям, вызывая так называемые "тихие землетрясения". Таким образом среду с разломом можно отнести к системам с перескоками (или с несмежными формами равновесия). В этом смысле поведение разлома аналогично поведению фермы Мизеса, состоящей из двух соединенных под углом упругих стержней.

АППАРАТНО-ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА МАГНУС ДЛЯ МОНИТОРИНГА И ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

А.Д. Гвишиани^{1,2}, А.А. Соловьев^{1,2}, Р.И. Красноперов¹, Р.Ю. Лукьянова¹

¹ - ГЦ РАН, Москва

² - ИФЗ РАН, Москва; r.krasnoperov@gcras.ru

Возмущения «космической погоды», такие как магнитные бури и суббури, вызванные взаимодействием солнечного ветра с магнитосферой Земли, могут оказывать серьезное негативное влияние на функционирование современных сложных технологических систем. Для обеспечения оперативного контроля и повышения надежности их работы необходимо осуществлять непрерывный мониторинг геомагнитного поля.

Комплексный мониторинг в настоящее время осуществляется наземными магнитными обсерваториями (в частности, международной сетью наблюдений ИНТЕРМАГNET), а также группировкой специализированных низкоорбитальных космических аппаратов миссии Swarm Европейского космического агентства (ЕКА). Эти средства наблюдений обеспечивают непрерывное поступление высококачественных данных как о внутреннем, так и о внешнем магнитном поле Земли. Быстрый рост объемов данных измерений требует использования адекватных методов для их эффективной обработки и анализа. Современные методы системного и интеллектуального анализа

позволяют реализовать формализованное многокритериальное распознавание экстремальных магнитных явлений различной природы, а также определять фоновое состояние геомагнитного поля. Комплексный и своевременный анализ обсерваторских и спутниковых данных позволяет моделировать структуры внутреннего и внешнего магнитного поля Земли с малой задержкой по времени. Возмущения «космической погоды», такие как магнитные бури и суббури, вызванные взаимодействием солнечного ветра с магнитосферой Земли, могут оказывать серьезное негативное влияние на функционирование современных сложных технологических систем. Для обеспечения оперативного контроля и повышения надежности их работы необходимо осуществлять непрерывный мониторинг геомагнитного поля.

В Геофизическом центре РАН была разработана инновационная аналитическая аппаратного-программная система МАГНУС (Мониторинг и Анализ Геомагнитных аномалий в Унифицированной Среде), предназначенная для эффективного сбора, хранения, обработки и интеллектуального анализа геомагнитных данных. Система МАГНУС является ядром российской сети магнитных обсерваторий и обеспечивает скоординированную обработку наземных наблюдений и магнитных измерений, полученных с помощью космических аппаратов спутниковой миссии EKA Swarm. Система включает в себя программные модули для автоматизированной фильтрации обсерваторских данных от технологических помех и проверки данных в соответствии с самыми высокими стандартами.

«ПОДВОДНЫЕ КАМНИ» ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

А.А. Годзиковская

godzanna@mail.ru

1. Из истории вопроса. Началом региональных сейсмологических исследований можно считать первые экспедиции конца 40-х, начала 50-х годов в Казахстане, Туркмении и Таджикистане, организованные и возглавлявшиеся директором Геофизического института АН СССР академиком Г.А. Гамбурцевым. Организация экспедиций была связана с разрушительными землетрясениями - Ашхабадским (1948 г.) и Хаитским (1949 г.). По результатам работ в 1949-51 гг. были выпущены годовые отчеты. Первая публикация, в которой были представлены как основные достижения, так и сложности, и перспективы дальнейших специальных исследований по высокочастотной сейсмометрии вышла в 1953 г. Усовершенствование методов исследований шло параллельно с решением конкретных геофизических задач. Основными центрами-школами региональной сейсмологии к середине 50-х годов стали две базы Комплексной сейсмической экспедиции (КСЭ) ИФЗ АН СССР, расположенные в Талгаре (Казахстан) и Гарме (Таджикистан). Со временем стали создаваться региональные сети сейсмостанций, к примеру: на Кавказе, Камчатке, в Забайкалье соответственно в начале 60-70-80-х годов.

2. Экспериментальные материалы наблюдений сейсмических станций: Сейсмограммы. Бюллетени сейсмических станций. Каталог землетрясений.

Каталог землетрясений наиболее часто используется исследователями в задачах: сейсмическое районирование; определение расчетного бала при строительстве особо ответственных объектов; исследование сейсмического режима (мониторинг). *Бюллетень сейсмической станции*, расположенной на окраине системы наблюдений дает возможность оценить: заведомо теряемую информацию определенного энергетического класса на определенных расстояниях и направлении от станции; оценить процент взрывов, проводимых на территории и попадающих в каталоги в качестве землетрясений. *Сейсмограммы* разрешают: выработать принцип дискриминации взрывов; контролировать глубины очагов, определяемых по кинематическим данным.

3. Опасность. 1. Региональные каталоги, как документ очень неоднороден по своему составу во времени и по площади. Полнота и достоверность параметров каталога зависят от геометрии наблюдательной сети и аппаратного оснащения станций. И то и другое во времени значительно меняется. Помимо этого, в большинстве регионов в каталогах находится значительное количество промышленных взрывов в качестве землетрясений. Незнание «пробелов» и «излишеств» в информации каталогов приводит к ложным результатам, особенно в задачах, связанных с анализом сейсмического режима (мониторинг). 2. При определении уровня сейсмической опасности недостоверные сведения о конкретных сейсмических событиях не могут быть уравновешены никакими методологическими и методическими разработками. Положения этого сообщения проиллюстрированы материалами районов расположения Токтогульской, Богучанской, Братской, Саяно-Шушенской ГЭС и сейсмической обстановкой на территории ВЕП.

ЭКСПАНСИЯ НЕФТЕГАЗОДОБЫЧИ И ПОДЗЕМНЫЕ ЯДЕРНЫЕ ВЗРЫВЫ КАК СПУСКОВОЙ КРЮЧОК СТРЕМИТЕЛЬНОГО ДРЕНИРОВАНИЯ АРАЛЬСКОГО МОРЯ ПОД ПЛАТО УСТЮРТ И В КАСПИЙ

Б.Н. Голубов

Институт динамики геосфер РАН, Москва; bgolubov@mail.ru

С 60-х годов минувшего века в области внутреннего стока Евразии все более зримо набирают силу сдвиги в динамике всех оболочек географической среды, которые были спровоцированы двумя необычными процессами. Первым из них явилось невиданное прежде стремительное обмеление Аральского моря. Оно зародилось в 1961-1963 гг. со скоростью 18-25 см/год, в 1969 г. было прервано импульсом кратковременного подъема на 15 см, а затем вновь усилилось до 70-100 см/год и стало подобно водовороту при срабатывании сливного клапана на дне емкости. Вторым таким процессом, возникшим вслед за обмелением Арала, явился резкий аномальный подъем уровня Каспийского моря с 1977 г., который непрерывно длился 18 лет, достигал порой чрезвычайно высоких значений 32-40 см/год и с 1995 г. сменился стадией более спокойных знакопеременных колебаний. По своей длительности и скорости этот подъем оказался рекордным за весь период инструментальных наблюдений уровня Каспия, которые ведутся с 1830 г. В предыдущих наших работах показано, что такое противофазное поведение уровней двух морей отражает особенности их подземной связи и могло быть спровоцировано техногенными нагрузками на недра молодой Туранской плиты. Это в основном экспансия нефтегазодобывающей промышленности в сочетании с тремя группами подземных ядерных взрывов (ПЯВ), проведенных в 1966-1973 гг. на Мангышлаке, а также в долинах рек Аму-Дарья и Сыр-Дарья.

Цель доклада – уточнить особенности срабатывания техногенных механизмов подземной связи Арала и Каспия на основе численных оценок показателей фильтрации подземных вод в пространстве между этими морями. В связи с этим в докладе предварительно обобщены полученные ранее результаты решения двух основных задач. Во-первых, выявлены геологические предпосылки подземной связи Арала и Каспия. Установлено, что Арал является потенциальной водокачкой по отношению к Каспию. Показано также, что земная кора Арало-Каспийского региона в силу особенностей её строения и новейшей истории геологического развития отличается незавершенностью геодинамических подвижек, а также неустойчивостью режима флюидодинамических систем разных типов, сосредоточенных в нефтегазоносных осадочных бассейнах региона. Во-вторых, выявлены масштабы техногенной дестабилизации недр, подземной гидросферы и поверхностных вод в пространстве между двумя морями. Охарактеризованы три волны экспансии нефтегазодобычи в регионе в досоветский, советский и постсоветский периоды, а также особенности взрывных и поствзрывных процессов, которые были возбуждены в зонах ПЯВ.

Численные оценки показателей подземного перетока вод Арала в Каспий осуществлялись тремя способами. Первый из них сводится к расчету расхода воды Q (см³/с) по формуле 1: $Q = k \cdot F \cdot (H_{\text{Арал}} - H_{\text{Каспий}}) / L$, где k – скорость фильтрации (см/с); F – площадь сечения потока; $H_{\text{Арал}} - H_{\text{Каспий}}$ – перепад высот уровней Арала и Каспия; L – дальность фильтрации. Этот прямой способ расчетов является вместе с тем спекулятивным и весьма неточным, поскольку, как это следует из натурных наблюдений, коэффициент k варьирует в широких пределах и поэтому его выбор оказывается весьма произвольным. Второй способ заключается в определении относительного показателя фильтрации подземных вод K в массиве горных пород, разделяющем Арал и Каспий, по формуле 2: $K = k_n / k_0$, где k_n – текущий коэффициент фильтрации в 1962-2002 гг., рассчитанный по формуле 1 на основе данных о наблюдаемом количестве потерь воды в Аральском море в этот период; k_0 – начальный коэффициент фильтрации в 1961 г., принятый за единицу. Этот способ исключает произвол расчетов по формуле 2. И хотя он не позволяет оценить объемы подземного перетока вод Арала в Каспий, но вместе с тем отчетливо отражает реакцию подземной гидросферы на импульсы техногенного воздействия на неё в моменты ПЯВ. Для того, чтобы подчеркнуть реальность такого воздействия изменчивость относительного показателя фильтрации подземных вод K оценивалась без учета испарения вод с поверхности Арала и с учетом такого испарения, равного 1 и 2 м/год. Оказалось, что даже при немислимо большой величине испарения показатель K испытывает заметный скачок в моменты ПЯВ в 1969-1970 гг. Это убеждает в том, что причиной стремительного обмеления Арала явились ПЯВ, породившие резкие возмущения режима фильтрации подземных вод, а не испарение с поверхности моря и соседних земель, как это ошибочно считают многие исследователи. Третий способ включает оценку объема вод Арала, сброшенных в Каспий по карстовым пустотам в отложениях верхнего миоцена в 1961-1995 гг. по формуле 3: $V = K_n \cdot H \cdot S$, где V – объем вод Арала, сосредоточенный в карстовых пустотах, см³; H – мощность карбонатных пород верхнего миоцена ниже поверхности +54 м (уровень Арала), см; S – площадь распространения пород верхнего миоцена ниже поверхности +54 м, см²; K_n – коэффициент пустотности карбонатных пород верхнего миоцена, %.

ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ НА ПАРАМЕТРЫ ШУМАНОВСКИХ РЕЗОНАНСОВ

Е.С. Гончаров^{1,3}, А.Н. Ляхов^{2,3}, Т.В. Лосева^{1,2,3}

¹ – Центр фундаментальных и прикладных исследований ВНИИА им. Н.Л. Духова, Москва; eggoncharov@yandex.ru

² – Институт динамики геосфер РАН, Москва

³ – Московский физико-технический институт, Долгопрудный

В области крайне низких частот (КНЧ, 5-40 Гц) распространение электромагнитных волн происходит специфическим образом. Благодаря тому, что длина волны соизмерима с радиусом Земли, в КНЧ диапазоне могут наблюдаться глобальные резонансы, когда частота колебаний совпадает с собственной частотой резонатора, обра-

зованного сферической полостью между Землей и ионосферой. Шумановские колебания образуют систему стоячих волн, охватывающих весь земной шар, поэтому характеристики КНЧ колебаний, наблюдаемые в любом пункте, зависят от состояния ионосферы во всех точках. Следовательно, изучение резонансных колебаний позволило бы определять глобальные параметры нижней ионосферы, характеризующие ее состояние в целом.

В настоящей работе применен трехмерный способ расчета собственных частот методом конечных элементов (FEM), с самосогласованным определением высоты отражения электромагнитных волн в трехмерном диспергирующем резонаторе с реальной картой проводимости земной поверхности. Для описания нижней ионосферы (40-100 км) использовались три модели нижней ионосферы, при помощи которых были созданы базы распределения диэлектрической проницаемости и электронной проводимости в полости волновода. Полученные распределения использовались в качестве исходных данных для решения задачи на собственные значения. Рассчитанные параметры Шумановских резонансов в случае невозмущенной ионосферы хорошо согласуются с экспериментом. На основе результатов выполнен анализ параметров резонанса, получена оценка влияния проводимости земной поверхности. Также проведена серия расчетов резонансных параметров в условиях мощных магнитных бурь ($K_p = 8$) и при рентгеновских солнечных вспышках различных классов. Полученные результаты проанализированы и сопоставлены с экспериментальными данными резонансных параметров, наблюдаемых в ГФО «Михнево» ИДГ РАН.

НАБЛЮДЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ, ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ И ИЗГИБНО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ В АКВАТОРИЯХ, ПОКРЫТЫХ ЛЬДОМ

П.Д. Груздев¹, Р.А. Жостков², А.Ю. Мореев¹, Ф.В. Передерин², Д.А. Преснов², А.Л. Собисевич²

¹АО «Концерн «МПО-Гидроприбор», Санкт-Петербург

²ИФЗ РАН, Москва; presnov@physics.msu.ru

В работе представлены результаты полевых экспериментальных работ, выполненных авторским коллективом в феврале 2017 года в акватории Ладожского озера. Целью настоящего исследования была экспериментальная проверка результатов аналитического расчёта, представленного в недавней работе [Presnov, Zhostkov, Gusev, Shurup, 2014], где были получены оценки скоростей различных волновых мод, формирующихся как в донных структурах акватории, так и в водном слое, и покрывающем слое льда. Одной из задач было разделение мод в принимаемом полном волновом поле. Исследование дисперсии поверхностных волн, распространяющихся вдоль границы дна и жидкого слоя даже без наличия ледового покрова, является актуальной задачей как при решении задач инженерной геологии, так и при поиске полезных ископаемых [Акопова, Бирюков, Григорьев, Тихоцкий, Шур, 2016]. Однако большинство технических средств и методов исследований на сегодняшний день являются зарубежными. В настоящей работе для регистрации естественных микросейсмических шумов и импульсных сигналов использовались инновационные молекулярно-электронные приемники отечественной разработки, а также маятниковые сейсмометры с обратной связью. Проведено сравнение данных эксперимента с результатами теоретических построений.

НЕЛИНЕЙНЫЕ ФРИКЦИОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ БЛОКА НА ДВИЖУЩЕМСЯ РАЗЛОМЕ

А.Ю. Губарь

ИФЗ РАН, Москва; parkAG@yandex.ru

Литосферная плита движется со скоростью $\mathbf{V} = e_1 V = const$, e_3 – нормаль внутрь плиты. Между блоком ($L_1 L_2 L_3$) и плитой – разлом толщиной d_3 . Пусть при $t \leq 0$ шов блок-разлом сцементирован (stick): $\Phi_{cm}(\sigma_{ij}) \equiv |\sigma_{13}| + k_c(\sigma_{33} + p_n) - \tau_s < 0$, где k_s и τ_s – (кулоновские) коэффициент поверхностного трения и сцепление, p_n – флюидное давление, $\sigma_{33} = -p_{33} < 0$ (сжатие). Движение плиты вызывает накопление упругих напряжений в блоке и разломе и при $t = 0$ ($|\sigma_{13}| = \tau_{fr}$, когда выполняется условие хрупкого разрушения Мора-Кулона: $0 = F_{cm}$ активизируется вскрытие ранее сцементированных трещин вдоль границы их максимального скопления по шву, где разрывы происходили и ранее. Шовная трещина растет с конечной скоростью v_r , не превышающей скорости поперечных волн V_s [Костров, 1975], и за время $t_r = L_1/v_r$ шов вспарывается по всей длине блока L_1 . Сразу после вспарывания осредненный по контакту $S_3 = L_1 L_2$ тангенциальный разрыв скола $a(t_r) \equiv s - s_0 = a_0(st)$ и $s_0(t)$ – средние на шву x_1 -смещения от НГНС блока и разлома) имеет порядок размера зерна или выступа шероховатости, скорость относительного скольжения берегов трещины ($V \equiv a$): $V(t_r)V_1 \approx v_r a_0/L_1$, а напряжение трения скольжения $\tau_{fr} = \tau_{fr}^1 > \tau_{fr}^0$. Факт падения усредненного напряжения трения скола при малых V фиксируется во многих экспериментах [Соболев, Пономарев, 2003; Кайдановский, 1972; Dieterich, 1983] и развивается в различных моделях трения [Rice, Ruina, 1983] (rate&state) и других [Арсеньев, 2014].

Считая блок монолитом, межблочную среду (включая разлом) – трещиноватой с флю-идом [Николаевский, 1984], НГНС – «боковым стеснением» [Ребецкий, 2008], и осредняя уравнения динамики по блоку и околоблочной среде, получаем следующие уравнения движения:

$$\text{Stick: при } V(t) = 0 \text{ и } \Phi_{CM}(\sigma_{ij}^b(s, \dot{s})) < 0 : a = 0, (s_d = s), \sigma_{13}^b(s, \dot{s}) = \sigma_{13}^d(s_{pd}, \dot{s}_{pd}, s) \quad (1)$$

Когда в (1) при некотором $t = t_0, s = s_0, \dot{s} = \dot{s}_0, \Phi_{CM}(\sigma_{ij}^b(s_0, \dot{s}_0)) = 0$ происходит хрупкое разрушение, борта трещины движутся под действием трения $\tau_{fr} = (|V|), \sigma_{33}^0(s) \dots, |V| < 0$ при $|V| < V_1$:

$$\text{Slip: } \frac{M_b}{2S_3} \ddot{s} = -\sigma_{13}^b(s, \dot{s}) - \text{sgn } V \cdot \tau_{fr}(|V|); \frac{M_d}{2S_3} \ddot{s}_{1d} = \sigma_{13}^d(-V_p t_0 - s_{1d}, -\dot{s}_{1d}, s) + \text{sgn } V \cdot \tau_{fr}(|V|) \quad (2)$$

При $V(t) = 0$ в (2) проверяется условие сцепления в (1), и если $\Phi_{CM}(\sigma_{ij}^b(s, \dot{s})) < 0$ то решается (1), в противном случае – (2). В (1-2): $s_{pd} = V_p t - s_d, s_{1d} = s_d - V_p(t - t_0), V = \dot{s} - \dot{s}_d$

$M_{b,d}$ – массы блока и подблочной части разлома, $\sigma_{13}^b(s, \dot{s}) = k^b s + \lambda^b \dot{s} + \sigma_{13}^0(s), k^b = \frac{G_b + L_3}{L_3} + \frac{L_3}{2} \left(\frac{K^*}{d_1^* L_1} + \frac{G_m}{d_2^* L_2} \right)$

$$\lambda^b = \frac{\eta_b}{L_3} + \frac{\eta_m L_3}{2d_2^* L_2}, \quad \sigma_{13}^d(s_{pd}, \dot{s}_{pd}, s) = k_1^d s_{pd} - k_2^d s + \lambda^d \dot{s}_{pd} + \sigma_{13}^0(s), \quad k_1^d = \frac{G_b}{L_3}, \quad k_2^d = \frac{d_3 K^*}{2d_1^* L_1}, \quad \lambda^d = \frac{\eta_m}{d_3}$$

$\eta_{b,m}$ – сдвиговые вязкости и модули блока и матрицы межблочной среды, K^* – сложная функция пористости, сжимаемости флюида и зерен и других реологических коэффициентов, $d_{2,1}^*$ – обратные средние обратных межблочных зазоров в направлениях $x_{1,2}, \sigma_{ij}^0(s)$ – осредненное по контакту НГНС, зависящее от глубины залегания и размеров блока, направления движения плиты и реологических свойств коры. Решение уравнений (1-2) при различных параметрах может описывать как тремор (стик-период: минуты-недели; частоты слипа: 0.1-100 Гц; магнитуды: менее 3) [Obata, 2002], так и тектонические ЗЛТ.

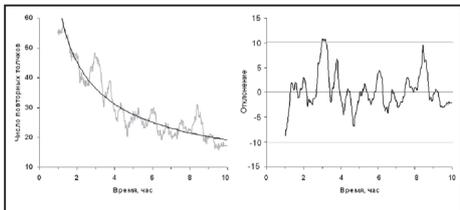
123 ГОДА ПОСЛЕ ОТКРЫТИЯ ОМОРИ

А.В. Гульельми¹, О.Д. Зотов², А.Д. Завьялов¹, И.П. Лавров²

¹ – ИФЗ РАН, Москва; guglielmi@mail.ru

² – Геофизическая обсерватория Борок ИФЗ РАН, п. Борок, Ярославская обл.

Доклад посвящен морфологии и физике афтершоков. 123 года тому назад 26-летний японский сейсмолог Фусакичи Омори обнаружил, что частота афтершоков в среднем гиперболически уменьшается с течением времени [Omori, 1894]. В докладе изложена замечательная история открытия закона Омори, и дано обобщение закона, позволяющее описывать немонотонную эволюцию афтершоков [Гульельми, 2017]. Немонотонность ведет к отклонению от закона Омори. Статистически значимое отклонение возникает под воздействием на очаг импульсного триггера в виде кругосветного сейсмического эха главного удара (ЭГУ).



Усредненная эволюция афтершоков (серая линия), ее аппроксимация (черная линия) и флуктуации потока афтершоков (слева и справа соответственно)

На рисунке слева показан поток афтершоков (серая линия) и его аппроксимация по методике Омори-Утсу (черная линия), а справа флуктуации потока. Горизонтальные линии проведены на уровнях $+3s$ и $-3s$, где s – среднеквадратичное отклонение. Мы видим, что пик кривой флуктуации возвышается над уровнем $+3s$ примерно три часа спустя после главного удара, как это и ожидается на основе гипотезы о существовании триггерного воздействия ЭГУ на очаг. Поскольку правило “трех s ” соблюдено, мы должны признать практически полностью достоверным вывод о существовании эффекта ЭГУ. Ведь вероятность того, что по случайной причине флуктуация числа афтершоков отклонится от среднего на величину больше $+3s$ не превышает 0.003.

Тем самым, доказана закономерность отклонения потока афтершоков от закона Омори примерно в три часа после главного удара. Введена безразмерная функция $G(t) = E(0)/E(t) - 1$ для анализа афтершоков и оценки кумулятивного воздействия эха главного удара на очаг (здесь E – плотность энергии афтершоков). Рекомендовано использовать обобщенный закон динамики афтершоков при анализе возможного воздействия на сейсмичность космофизических факторов, в особенности, межпланетного магнитного поля. Работа выполнена при финансовой поддержке Программы 15 Президиума РАН и РФФИ (проекты №№ 16-05-00056 и 15-05-00491).

ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В МАГНИТОСФЕРЕ: К СТОЛЕТИЮ В.А. ТРОИЦКОЙ

А.В. Гульельми¹, А.С. Потопов², Б.В. Довбня³, Б.И. Клайн³, О.Д. Зотов³, И.В. Стерликова⁴, В.Ф. Рубан⁵, И.П. Лавров³

¹ – ИФЗ РАН, Москва; guglielmi@mail.ru

² – Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск; potapov@iszf.irk.ru

³ Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Ярославская обл., п. Борок; dovbnya@inbox.ru

⁴ – Московский психолого-социальный университет, филиал ОАНО МПСУ, Владимирская обл., Муром; sterlikova52@mail.ru

Мы, ученики и сотрудники профессора Валерии Алексеевны Троицкой (1917-2010 гг.), посвящаем этот доклад ее памяти. В этом году ей исполнилось бы 100 лет. Ее выдающиеся достижения в геофизике и космофизике широко известны. На протяжении многих лет Валерия Алексеевна была Президентом Международной ассоциации по геомагнетизму и аэрономии. В докладе мы представляем лишь один аспект многогранной творческой активности профессора В.А. Троицкой. Речь идет об исследовании триггерных эффектов в магнитосфере Земли. Это направление живо интересовало Валерию Алексеевну. Мы излагаем ее результаты, ставшие классическими, и освещаем современное состояние проблемы. Рассмотрены триггерные эффекты на периферии магнитосферы, в радиационном поясе и в ионосфере. Представлены триггерные эффекты в богатейшем материале наблюдения ультранизкочастотных (УНЧ) электромагнитных колебаний. Особое внимание уделено ключевой роли межпланетного магнитного поля в формировании режима УНЧ колебаний. Уделено внимание триггерному воздействию динамических процессов в литосфере и техносфере на колебательные системы магнитосферы и ионосферы. Затронут вопрос о наблюдении в полярных районах 5-минутных колебаний Солнца, известных из гелиосейсмологии. *Работа выполнена при финансовой поддержке Программы 15 Президиума РАН и проектов РФФИ №№ 16-05-00056 и 16-05-00631.*

ГРАНИЦА МОХО – КАК РЕГУЛЯТОР СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В ЗОНЕ СУБДУКЦИИ

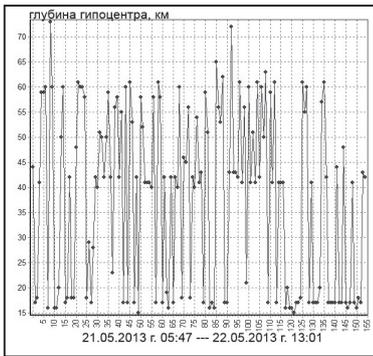
И.Л. Гуфельд¹, О.Н. Новоселов²

¹ - ИФЗ РАН, Москва; igufeld@korolev-net.ru

² - Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва; onn-aan@yandex.ru

Одной из причин отсутствия прогресса в работах по предупреждению о краткосрочной и среднесрочной сейсмической опасности является слабое внимание к физике сейсмического процесса в реальной геологической среде. Основное внимание уделяется статистике сейсмических актов и анализу результатов моделирования процессов разрушения на образцах, не обращая внимания на состояние среды, а также особенности фоновых процессов и перехода фонового состояния среды в предкатастрофическое. Задумается, если в среде непрерывно происходят процессы разрушения различного масштаба, включая повторяющиеся акты взрывной неустойчивости (крупномасштабное разрушение), а среда никак не разрушится и продолжает жить своей жизнью, то необходимо пересматривать представления о движущих силах сейсмического процесса. Сейсмический процесс в зоне субдукции имеет существенные особенности.

Сейсмичность в зоне субдукции контролируется бегущими деформационными волнами, контролируемые восходящими потоками водородной дегазации и особенностями строения и структуры среды, формируемой дегазацией и литостатическим давлением. Непрерывная сейсмичность проявляется в процессах нарушения аккомодации элементов среды относительно друг друга, в виде быстрой или медленной ("тихие землетрясения") поддвижек вдоль готовых граничных структур. Такая непрерывная и долговременная "сейсмичность" не разрушает среду. При этом реализуется кооперативный процесс нарушения аккомодации отдельных элементов среды путем поддвижек в режиме сверхпластичности [Гуфельд, Афанасьев, Афанасьева, Новоселов, 2010; Гуфельд, Новоселов, 2015]. Однако нужно учитывать, что строение среды (а это не образцы) в результате водородной дегазации и действия литостатического давления имеет определенные особенности, которые могут оказывать влияние на развитие сейсмического процесса. Мы имеем в виду сейсмическую латеральную "расслоенность" среды и такие известные границы, как граница Мохо. Эти границы контролируют восходящие потоки водорода и направленность их дальнейших движений, формируя разномасштабные деформационные волны. Причем, граница (слой) Мохо представляет собой барьерной зоной, где возможно накопление водорода из мантии и последующий его сток к поверхности в различных направлениях уже в двухфазной среде. Эта "расслоенность" среды способствует перераспределению потоков легких газов в горизонтальном направлении, создавая для вертикального направления условия эстафетной передачи упругой энергии деформационными волнами. Мы работаем со средой с внутренними распределенными по объему источниками энергии, где нельзя выделить четких границ. Именно поэтому фоновое состояние среды и предкатастрофическое состояние резко различаются. Поддержание таких состояний контролируется поступлением в зону выше границы Мохо легких газов. Контроль за этими процессами может осуществляться по положению во времени гипоцентров событий в зоне Мохо и энергетических параметров событий.



Этим исследованиям, а также особенностям инициации развития по глубине глубокофокусных событий, будет посвящен доклад. Целью этих исследований является разработка методологии среднесрочной и краткосрочной оценок вероятного периода сейсмической опасности, учитывая, что развитие сейсмического процесса не является детерминированным.

Рис. Последовательность развития процесса во времени в пределах 1° градуса по долготе и 0.3° по широте. Камчатка. Зона субдукции

ОБРАЗОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ МАКРОРАЗРЫВА В ДЕФОРМИРОВАННОМ ОБРАЗЦЕ ГРАНИТА: АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ И РЕНТГЕНОВСКАЯ ТОМОГРАФИЯ

Е.Е. Дамаскинская¹, И.А. Пантелеев², Д.Р. Гафурова³, Д.И. Фролов¹, В.Л. Гуляров¹, Д.В. Корост³

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

² - Институт механики сплошных сред Уральского отделения РАН, Пермь

³ - Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова; Kat.Dama@mail.ioffe.ru

Целью работы является экспериментальное выявление закономерностей эволюции дефектной структуры в объеме материала в процессе механического воздействия. Для этого используется комплекс современных экспериментальных и теоретических методов. Проведены прямые исследования накопления дефектов с помощью двух неразрушающих методов: акустической эмиссии (АЭ) и рентгеновской компьютерной микротомографии.

Квазистатические испытания цилиндрических ($d = 10 \text{ mm}$, $h = 20 \text{ mm}$) образцов гранита Westerly проводились в условиях одноосного сжатия на электромеханической испытательной машине Shimadzu AGX-Plus. Для непрерывного мониторинга акустической эмиссии в процессе деформирования была использована система Amsy-5 Vallen (Германия). Широкополосные преобразователи акустической эмиссии AE105A с полосой 450-1150kHz располагались внутри специально изготовленных полых цилиндрических платформ, по одному с каждого торца образца. Образец гранита деформировался поэтапно. На каждом этапе образец плавно (со скоростью $\approx 5 \text{ N/s}$) нагружался до определенной нагрузки F и затем выдерживался при данном уровне нагрузки (F) до тех пор, пока активность сигналов АЭ не спадала до нуля. На следующем этапе нагрузку F увеличивали на $0.08 F_{\text{max}}$ (F_{max} - разрушающая сила). После каждого этапа образец разгружали и выполняли томографическую съемку с помощью аппаратного комплекса ScyScan 1172. Всего проведено 11 этапов нагружения и томографической съемки. Томографическая съемка образца с пространственным разрешением 5 mkm , проведенная до начала механических испытаний, показала, что дефектов типа трещин в материале не обнаружено. В результате анализа томографических данных показано, что при значениях нагрузки, меньших, чем $0.92 F_{\text{max}}$, нарушений сплошности материала с размером более 5 mkm не наблюдается. В то же время удается зарегистрировать небольшое (по сравнению с финальной стадией деформирования) число сигналов акустической эмиссии.

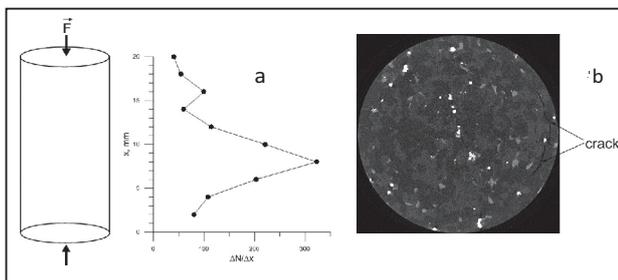


Рис. 1. Распределение координат гипоцентров сигналов АЭ (а); пример томографического среза (b)

По мере приближения к моменту разрушения ($F > 0.83 F_{\text{max}}$) активность акустической эмиссии существенно возрастает, а линейная локация гипоцентров источников сигналов АЭ позволяет выделить области с повышенной концентрацией источников (рис. 1,а). Именно в этих областях на томографических срезах образца (рис. 1,б) видны тонкие преимущественно трансверсальные трещины (раскрытие не более 5 mkm). Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 16-05-00237_а, 17-05-00720_а).

СПОСОБ ПРОГНОЗА ШУМА НИЗКОЧАСТОТНОЙ ДЕКОНВОЛЮЦИИ: РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВ НА СИНТЕТИЧЕСКИХ И ЛАБОРАТОРНЫХ ДАННЫХ

П.А. Дергач, В.И. Юшин

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; dergachpa@ipgg.sbras.ru

Электродинамический сейсмоприемник (геофон) на данный момент является самым массовым датчиком для регистрации сейсмических колебаний. Основное препятствие для его применения во многих областях – относительно высокая собственная частота (10-15 Гц). Однако цифровая запись сигнала, полученного таким датчиком с помощью математической вычислительной процедуры, называемой низкочастотной деконволюцией, может быть преобразована в запись аналогичного датчика с нижней граничной частотой на порядки ниже исходной. Из последних исследований по данной тематике стоит отметить работы [Юшин, 2001; Беседина, Кабыченко, Кочарян, Павлов, 2011]. Одним из важных ограничений метода является наличие шума измерительного канала, что не позволяет однозначно определить, до каких пределов можно расширять частотный диапазон записей.

В данной работе предложен способ прогноза роста уровня шума низкочастотной деконволюции по мере расширения частотного диапазона сейсмических записей. Для случая исходного аппаратного шума в виде «белого» шума авторами получена теоретическая оценка кратности роста шума деконволюции по мере снижения ее нижней частоты [Дергач, Юшин, 2016]. Она выражается в виде отношения среднеквадратических амплитуд шума деконволюции и исходного аппаратного шума. Однако шум реального сейсмического регистратора отличается от «белого» шума. В частности, с уменьшением частоты спектральная плотность мощности (СПМ) аппаратного шума начинает возрастать обратно пропорционально частоте [Ли, 2010]. Для учета влияния этой низкочастотной шумовой характеристики был программно реализован алгоритм расчета отношения стандартного отклонения шума после процедуры деконволюции к стандартному отклонению исходного шума в ограниченной полосе частот.



Рис. 1. Кратность роста шума деконволюции по мере снижения ее относительной частоты

Результаты расчетов для синтетической модели шума рис. 1 (серая линия) и аппаратного шума цифрового автономного регистратора РОСА-А, полученного в результате лабораторного эксперимента рис. 1 (черная пунктирная линия), с высокой точностью совпали. Сравнительный анализ кривых наглядно иллюстрирует значительное отличие характера роста шума деконволюции на низких частотах от теоретической закономерности, основанной на предположении «белого» шума.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ДОБРОТНОСТНЫХ СВОЙСТВ ЗЕМНОЙ КОРЫ ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА

А.И.Дубянский¹, М.А.Ефременко²

¹ - Воронежский государственный университет

² - ФИЦ ЕГС РАН, Воронеж

Важным моментом, определяющим возможность использования записей сейсмических волн, генерированных промышленными взрывами в карьерах, для мониторинга добротностных свойств земной коры является оценка степени влияния мощности суммарного заряда на амплитуды упругих колебаний и длительность записи, включающей как регулярные волны, так и коду. Для анализа использовались записи сейсмических волн от взрывов в «Павловском» карьере, мощности которых были известны. В рамках поставленной задачи оценивалась зависимость от величины суммарного заряда (Q) модулей вертикальной ($|V_z|$) и горизонтальной ($|V_h|$) компонент и модуля полного вектора смещений почвы ($|V|$), а также длительности записи, то есть время от первых вступлений до момента, когда уровень амплитуд сейсмического сигнала уменьшится до фонового значения. Указанные зависимости определялись в полосе частот 0.4-0.8 Гц. Зависимости $|V_z|$, $|V_h|$ и $|V|$ от веса заряда, полученные при использовании в качестве ВВ в «Павловском» карьере акванала показали, что увеличение веса заряда практически не влияет на амплитуды рассматриваемых волн при регистрации вертикальной компоненты и весьма слабо отражается на увеличении энергии колебаний горизонтальной составляющей (рис. 1). Как показало моделирование и опыт использования карьерных взрывов при глубинных сейсмических исследованиях практическое отсутствие зависимости амплитуд сейсмических сигналов от мощности суммарного заряда связано с тем, что при короткозамедленном

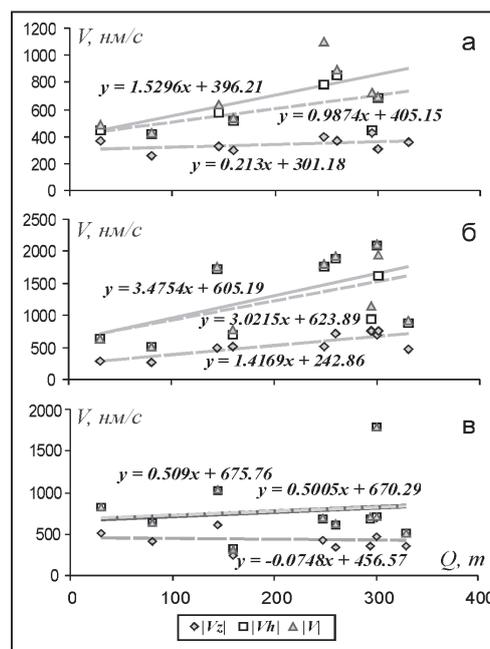


Рис. 1. Зависимости скорости смещения грунта (V) от веса суммарного заряда: а- Р-волн; б - S-волн, в - поверхностных волн

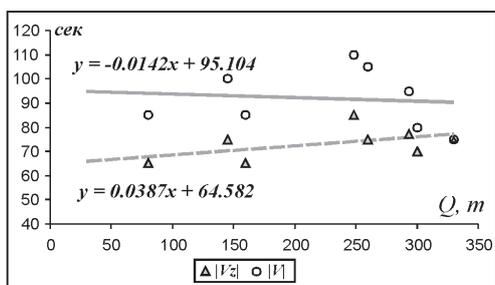


Рис. 2. Зависимости времени коды от веса суммарного заряда

взрыве амплитуда сейсмической волны в дальней зоне определяется воздействием только двух-четырех ступеней с практически постоянным объемом взрывчатого вещества на одно замедление [Литосфера Воронежского ..., 2012]. Сопоставление длительности записи вертикальной компоненты $|V_z|$ и мощности карьерных взрывов обнаружило практически отсутствие связи между этими величинами (рис. 2). Практическая независимость длительности записи от суммарной мощности карьерного взрыва открывает возможность использовать коду сейсмической записи для оценки и мониторинга добротности земной коры Воронежского кристаллического массива.

ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТУВЫ ПО ФОНОВОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ И ПО АФТЕРШОКОВЫМ ПРОЦЕССАМ КРУПНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

А.Ф. Еманов^{1,2}, А.А. Еманов А.Ф.^{1,3}, Е.В. Лескова^{1,3}

¹ - Алтае-Саянский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Новосибирск; emanov@gs.sbras.ru

² - Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

³ - Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск

В данной работе на основе изучения структурных особенностей афтершоковых процессов формируются представления о тектонических процессах в очаговых областях крупнейших землетрясений Тувы. Исследования выполняются по сильным землетрясениям: Урэг-Нурскому ($M_s = 7.0$, 1970 г.), Бусингольскому ($M_s = 6.5$, 1991 г.), Белин-Бий-Хемскому ($M_w = 5.7$, 2008 г.), Саянскому ($M_L = 6.1$, 2011 г.) и Тувинским ($M_L = 6.7$, 2011 г. и $M_L = 6.8$, 2012 г.). Осуществляется сопоставление результатов, полученных из анализа афтершоковых процессов отмеченных землетрясений с изучением фоновой сейсмичности региона.

Процессы в очаговых областях крупнейших землетрясений Тувы проливают свет на геодинамику региона. Тектонический режим Тувы характеризуется как транспрессия (сдвиг в условиях сжатия) [Саньков, Парфеев, Лухнев, Мирошниченко, Ашурков, 2011]. Именно такой режим в целом подтверждает закономерности развития фоновой сейсмичности, а вот данные о крупных землетрясениях Тувы, не отвергая общей концепции, говорят о значительном влиянии на сейсмический процесс локальных условий деформирования земной коры. Так афтершоковый процесс Бусингольского землетрясения приурочен к оперяющему разлому, разделяющему блоки горного обрамления и под острым углом примыкающему к Бусингольской впадине. После землетрясения сформировалась уникальная по длительности и пульсирующему режиму сейсмическая активизация [Еманов, Еманов, Филина и др., 2006; Еманов, Еманов, Лескова, 2010]. Белин-Бий-Хемское землетрясение произошло в районе изгиба на севере Белинской впадины в восточном направлении. Афтершоковый процесс развивался поперёк главных разломов, ограничивающих блок с севера и с юга, кинематика северного разлома сдвиговая, южного – растяжение [Еманов, Лескова, Еманов и др., 2014], установлено вращение блока. Для Тувинских землетрясений доказано, что ведущую роль в создании напряжённого состояния сыграл процесс медленного выдвигания клинообразного хребта Ыдык к северу [Еманов, Еманов, Лескова и др., 2012]. Афтершоковый процесс Саянского землетрясения [Еманов, Лескова, Еманов и др., 2013] развивался поперёк горного хребта. Сопоставляя данные о сильных и слабых землетрясениях и об афтершоках, можно предполагать, что сейсмичность Западного Саяна в значительной степени может объясняться неравномерным воздействием блочных структур Тувинской котловины на него. Выдвижение блоков Тувинской котловины к северу с разной скоростью приводит к неравномерности воздействия на Западный Саян и к активизации время от времени поперечных разломов, обычно спокойных в фоновом режиме сейсмичности. При Урэг-Нурском землетрясении основной толчок вызвал разрывы вокруг достаточно небольшого блока горы Цагдул-Ула, при этом разрывы уходят в стороны по граням смежных блоков в сторону хр. Цаган-Шибету. Весьма вероятно, что разрыв на глубине продолжается в хр. Цаган-Шибету, и этим объясняется выход афтершокового процесса во внутреннюю область этого хребта. Важной особенностью афтершокового процесса Урэг-Нурского землетрясения является приуроченность событий не к главным блокоразделяющим разломам, а к внутриблочным разрывам более низкого порядка [Еманов, Еманов, Лескова и др., 2012].

РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА НАВЕДЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ В КУЗБАССЕ

А.А. Еманов^{1,2}, А.Ф. Еманов^{1,3}, А.В. Фатеев^{1,2}, Е.В. Лескова^{1,2}, Д.Г. Корабельщиков¹

¹ - Алтае-Саянский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Новосибирск; alex@gs.sbras.ru

² - Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск

³ - Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

Сейсмологические станции на территории Кузбасса, являющиеся частью сети станций Алтае-Саянской горной области, на сегодняшний день позволяют осуществлять мониторинг сейсмических событий на совершенно новом уровне. Если до 1997 г. в Кузбассе работала одна сейсмологическая станция, то на сегодняшний момент совместными усилиями сотрудников АСФ ФИЦ ЕГС РАН, Администрации Кемеровской области и угольных компаний региона сеть мониторинга в Кузбассе состоит из 18 сейсмологических станций, которые оснащены современной широкополосной аппаратурой и данные с которых в реальном времени передаются в центр сбора и обработки АСФ ФИЦ ЕГС РАН (г. Новосибирск), где осуществляется автоматическая обработка совместно с региональной сетью станций с оперативностью 1-2 минуты после времени в очаге и дальнейшая уточнённая обработка [Еманов, Еманов, Фатеев и др., 2015]. Многие станции расположены в районах предприятий, добывающих уголь, и система ориентирована на мониторинг наведённой сейсмичности. В реальном времени осуществляется отслеживание зон наиболее сильного развития сейсмического процесса. В конце 2016 г. кроме регулярно сейсмически активных мест добычи угля обнаружена новая сейсмическая активизация на юге Кузбасса, отметившаяся серией ощутимых землетрясений [Еманов, Еманов, Фатеев и др., 2017]. Для детального исследования природы сейсмического процесса в районе активизации развёрнуты временные сейсмологические станции.

Калтанский угольный разрез ведёт добычу угля на двух полях: Осинниковское и Калтанское, являющихся по сути двумя близ расположенными самостоятельными разрезами. Добыча угля ведётся с 1957 г., среднегодовой объём добычи составляет около 3,5 млн тонн угля. В этом же районе ведётся подземная добыча угля шахтой «Алардинская» со среднегодовым объёмом добычи около 3,6 млн тонн угля. Информация о промышленных взрывах представлена администрацией угольной компании и проверялась по наличию звуковой волны на сейсмограммах. Кроме промышленных взрывов зарегистрированы техногенные землетрясения, составляющие две активизации разного энергетического уровня. Одна сейсмическая активизация связана с открытыми горными работами. Активизирована площадь, охватывающая оба поля Калтанского угольного разреза с наиболее сильной сейсмической активностью около Осинниковского поля, где происходили землетрясения с магнитудой 2.5 и выше. Именно эти землетрясения вызвали ощутимые сотрясения на значительной площади. Крупнейшие события происходили в одной локальной зоне отвалов Осинниковского поля. Отвалы являются искусственно созданными грунтовыми массивами, оказывающими локальное и сильное воздействие на земную кору. Ответная на воздействие активизация с учётом малых глубин очагов (первые километры) и приуроченности к району может интерпретироваться как наведённая сейсмичность [Еманов, Еманов, Фатеев и др., 2017]. Вторая сейсмическая активизация состоит из землетрясений с магнитудами менее двух. Все землетрясения данной активизации сосредоточены на локальном участке, соответствующем подземной добыче угля шахтой «Алардинская». Фактически внутри техногенной сейсмической активизации одного типа существует сейсмическая активизация другого типа.

ПОГЛОЩЕНИЕ «ДИНАМИЧЕСКОЙ» КРЕПЬЮ ЭНЕРГИИ ГОРНЫХ УДАРОВ, ВЫЗВАННЫХ ТРИГГЕРНЫМ ЭФФЕКТОМ ШАХТНОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ В УСЛОВИЯХ РАЗРАБОТКИ УДАРООПАСНЫХ РУДНИКОВ

В.А. Еременко¹, М.А. Косырева²

¹ - Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Москва; eremenko@ngs.ru

² - Российский университет дружбы народов, Москва; kosyrevamarina.9@mail.ru

В последние годы возросло количество шахт и рудников опасных по горным ударам вследствие увеличения глубины горных работ и выработанного пространства. Возникновение динамических проявлений горного давления, вызванных триггерным эффектом шахтной сейсмичности в условиях разработки удароопасных рудников с локальной магнитудой порядка 1,5-3,0 ML уже не редкость и приводят к разрушению выработок, представляя серьёзную угрозу безопасности работы горняков [Kaiser, McCreath, and Tannant, 1996]. Одним из способов снижения последствий горных ударов является установка «динамической» крепи, способной выдерживать воздействия динамических проявлений горного давления высокой магнитуды. Оптимальная «динамическая» крепь должна обладать способностью сдерживать обрушение при горном ударе, и в то же время быть относительно не дорогой и практичной при установке. Разработана методика выбора крепи, которую рекомендуется применять при разработке скальных пород в условиях удароопасности. Различные виды анкерных и поверхностных крепей изучаются с позиций энергопоглощения и деформируемости [Louchnikov, Eremenko and Sandy, 2014]. Для расчета крепи, выдерживающей горный удар в виде сброса, необходимо знать три основных параметра: магнитуду расчетного события, расчетное расстояние до источника сейсмического события и расчетную массу вывала. В условиях динамической нагрузки крепь должна поглощать кинетическую энергию колебания горного массива, а также потенциальную энергию массы сбрасываемой трещиноватой породы, смещающейся в выработку под действием силы тяжести. Таким образом, полная величина энергии, которая поглощается динамической крепью (энергетическая нагрузка на крепь), оценивается следующим

образом: $E = \frac{1}{2} m \cdot (p_{\text{пр}} \cdot SE)^2 + qmgd$ кДж, где m - расчетная масса нарушенных горных пород, кг; $p_{\text{пр}}$ - максимальная скорость колебания массива на контуре выработки, м/с; SE - коэффициент амплификации (приращение сейсмической активности); q - константа, равная 1 для горного удара в кровле, 0 — в борту выработки и -1 — в почве; g - ускорение свободного падения, м/с²; d — расстояние движения горной массы в закрепленную выработку, м. Крепь в условиях динамического нагружения должна поглощать сейсмическую энергию с достаточным коэффициентом запаса прочности, чтобы выдержать последующие афтершоки, а также вследствие неточности входящих в расчеты данных, характеризующих сейсмичность и удароопасность массива горных пород. При проектировании динамических крепей коэффициент запаса прочности рекомендуется брать не менее 2. Методика выбора «динамической» крепи для подземных горных выработок, пройденных в шахтах склонных к горным ударам, основана на оценке энергетической нагрузки на крепь в динамических условиях проведенной на основе анализа данных сейсмомониторинга и обратного анализа параметров произошедших горных ударов.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ И ВРЕМЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВЗРЫВАХ ПО ФОРМИРОВАНИЮ ЭЛЕМЕНТОВ ГЕОТЕХНОЛОГИИ

А.А. Еременко, В.Н. Филиппов, А.И. Конури

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Новосибирск

Железорудные месторождения Горной Шории располагаются на отрогах Алтае-Саянской складчатой области и разрабатываются на глубинах 600-1000 м и более. Быстрое понижение горных работ на подземных рудниках сопровождается увеличением напряжений в массиве, горными ударами и усложнением геотехнологии очистных работ. В этой связи проведены исследования с применением различных методов геомеханической оценки состояния массива горных пород по установлению закономерности пространственного, энергетического и временного распределения геодинамических явлений при технологических взрывах по оформлению компенсационных камер, подсечных пространств и воронок выпуска горной массы, а также по обрушению панелей блоков. Установлены зоны концентрации и распределения толчков различной интенсивности от 10 до 10⁶ Дж в шахтном поле. Выявлено пространственное, энергетическое и временное распределение геодинамических явлений на различных глубинах при производстве технологических взрывов различной мощности и местоположения. Даны периоды роста и уменьшения энергетического класса толчков при отработке слепых рудных тел системами разработки с массовым обрушением руд и пород, а также с закладкой выработанного пространства. Разработанные и реализованные рекомендации позволили обеспечить безопасность и повысить эффективность горных работ.

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОвого ПОЛЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ

Ж.Ш. Жантаев, А.В. Виляев

Национальный центр космических исследований и технологий Институт ионосферы

050020, Республика Казахстан, Алматы, Каменское плато; vilayev@gmail.com

Рассматривается воздействие неравномерного распределения температуры земных недр на формирование сейсмической активности на примере территории Северного Тянь-Шаня. Обобщены и систематизированы данные о параметрах теплового потока земной коры. Выявлены закономерности распределения теплогенерирующих элементов с глубиной, составлены объемные 3D геотермические модели. Выполнен сравнительный анализ геотермической модели с проявлениями сейсмической активности. Численными методами решено трехмерное уравнение кондуктивного теплопереноса с начальными и граничными условиями и с учетом дополнительных источников радиогенного тепла. Тепловой поток на поверхности определен по данным наземных измерений в скважинах. Дополнительно привлечена информация о распределении в разрезе скорости продольных волн, зависимости коэффициента теплопроводности от петрологического состава горных пород, температуры и давления. Под горными сооружениями Северного Тянь-Шаня на глубинах 35-60 км выделены области частичного плавления с температурами пород на 100÷250 °C выше солидуса. По изотерме аномальных температур в 230 °C и изобаре термоупругих напряжений интенсивностью 0.35 GPa околонурина область температурных нагрузок, превышающих критическую прочность горных пород. Максимальные значения термонапряжений в аномальной области достигают 0.48 GPa, что составляет 25÷30% от литостатического давления. Наиболее сильные катастрофические землетрясения прошлого века (Верненское M = 7.1, Кеминское M = 8.0) произошли в областях максимального привноса мантийного тепла.

Выполненные исследования не следует считать доказательством того, что тепловое поле однозначно является единственной причиной происходящих в регионе землетрясений. Тем не менее, полученные данные позволяют сделать вывод о преобладающем влиянии температурных условий на развитие сейсмического процесса.

ДИАГНОСТИКА ВАРИАЦИЙ ПОЛЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ УЧАСТКОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПО ДАННЫМ GPS НАБЛЮДЕНИЙ

Ж.Ш. Жантаев, А.В. Виляев

Национальный центр космических исследований и технологий Институт ионосферы
050020, Республика Казахстан, Алматы, Каменское плато; vilayev@gmail.com

Сделана попытка построения триггерной модели деформации приповерхностных участков земной коры. Показана возможность применения GPS мониторинга для диагностики вариаций напряженно-деформированного состояния. Анализ временных рядов суточных координат GPS станций для оценки векового движения земной поверхности в настоящее время стал рутинной операцией. В основном предполагается линейное движение тектонических блоков, также называемое линейным трендом. В то же время большинство временных рядов GPS содержат сезонную вариацию с амплитудами соизмеримыми с линейным трендом. Причиной сезонных вариаций могут быть изменения атмосферных и приливных нагрузок, сезонные температурные эффекты, а также изменения гидрологического режима. Как правило, в геодинимических построениях применяется устранение короткопериодных сезонных вариаций из наблюдений для повышения точности определения глобальных тектонических движений. Тем самым не учитывается триггерный характер высокочастотной деформации.

Исходные данные за период 2009-2015 гг. представлены измерениями координат 10 опорных GPS станций, расположенных в предгорных районах хребта Заилийский Алатау и в платформенной части Казахского щита. Обработка выполнена программным комплексом GAMIT/GLOBK в системе координат ITRF2008. По линейному тренду установлено субмеридиональное движение отдельных блоков земной коры в северном направлении со скоростями $1\div 5$ мм/год и знакопеременное движение со скоростями до 2 мм/год по модулю для компоненты запад-восток. По вертикали наблюдается поднятие западной части территории с амплитудой $1.2\div 4.0$ мм/год. Также установлено сезонное годовое и полугодовое периодическое вращательное движение пунктов в горизонтальной плоскости, аппроксимируемое эллипсом. Амплитуда перемещений, определяемая по главной оси эллипса, изменяется от 2 до 4 мм в сезон. В весенне-летний период преобладает северо-восточное направление сезонных движений, в осенне-зимний – юго-восточное. Совместно с линейными трендовыми движениями сезонные изменения координат станций априорно приняты за параметр, отражающий упругое состояние деформируемой под нагрузками поверхности Земли, независимо от вопроса определения источника вариаций. Скорости движения дискретных пунктов интерпретированы, как абсолютные величины деформаций в единицу времени. Основой расчетов напряженно-деформированного состояния послужили известные уравнения механики деформируемых твердых тел. На регулярной сетке построено поле деформаций и напряжений верхней части земной коры, рассчитанное в разных вариантах: – для низкочастотных (вековых) движений и – с учетом короткопериодных сезонных вариаций. В первом варианте особенностью горизонтальных деформаций максимального сжатия является наличие сжимающих напряжений до 30 нанострейн/год субширотного простирания, которые вызывают деформационное укорочение горных хребтов Кунгей и Заилийский Алатау с юга на север. В центральной части проявляются девиаторные растяжения, ориентированные в целом субширотно с амплитудами до 20 нанострейн/год. Во втором варианте амплитуда главных компонент сезонных деформаций изменяется в пределах $-35\div 70$ нанострейн/год, что в отдельных блоках в несколько раз превышает значения соответствующих компонент низкочастотных деформаций. Аддитивная оценка сезонных и вековых деформаций поверхности демонстрирует триггерный характер вариаций поля напряженно-деформированного состояния при наличии устойчивого векового тренда. Наблюдается выраженная пространственная приуроченность эпицентров сильных землетрясений к расположению экстремумов поля деформаций, рассчитанных с учетом сезонных вариаций.

ИЗУЧЕНИЕ СЕЙСМОУСТОЙЧИВОСТИ ГОРНОГО МАССИВА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ВЕДЕНИЯ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ НА ПРЕДЕЛЬНОМ КОНТУРЕ КАРЬЕРА

С.Н. Жариков

Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург; 333vista@mail.ru

Увеличение угла откоса бортов карьера ведет к снижению объемов разности и повышает экономическую эффективность разработки месторождения. Однако, при этом повышается риск обрушения откосных сооружений в карьере в результате геодинимических движений, связанных с горным давлением и влиянием кратковременных импульсных нагрузок, вызванных ведением взрывных работ. Оценка устойчивого состояния откосного сооружения при определенном угле основывается на измерениях сдвига массива в том или ином направлении в рамках достаточно продолжительных периодов наблюдений, при этом, короткопериодные деформации, приводящие к локальным межблочным подвижкам при обосновании устойчивых углов, не учитываются. В этой связи, не достаточно аккуратное ведение буровзрывных работ вблизи откосных сооружений может вызвать нарушение их устойчивости и привести к катастрофическим оползневым явлениям. В последнее время горные предприятия проявляют особый интерес к заоткосным работам при подходе буровзрывных работ к предельному контуру карьера. Во-первых, очевид-

ным является тот факт, что даже увеличение затрат на БВР в приконтурной зоне при повышении качества исполнения и соответствующего контроля ведёт к повышению безопасности горных работ, сохранению устойчивого состояния откосов, а, следовательно, повышению экономической эффективности разработки месторождения в целом. Потому, что ликвидация, например, оползня, связана с частичной остановкой добычных работ, а в некоторых случаях с полной остановкой и соответствующим ущербом, иногда с человеческими жертвами. Получается, что повышение безопасности на опасном производственном объекте это не просто статья затрат, а весомый вклад в развитие предприятия, который существенно определяет экономическую эффективность добычи будущих периодов.

Институт горного дела (ИГД УрО РАН) выполняет научно-исследовательские работы по внедрению специальной технологии БВР на предельных контурах карьеров. Для снижения динамического воздействия технологических взрывов на устойчивость откосных сооружений карьера проводится комплекс исследований сейсмической устойчивости горного массива. По результатам исследований сейсмоустойчивости горных пород разрабатывается специальная технология производства БВР на предельном контуре карьера. Технологические приёмы проходят промышленные испытания в рамках соответствующей программы, которая утверждается руководством горного предприятия, включает этапы выполнения, перечень необходимых ресурсов, порядок контроля за выполнением пунктов программы. После реализации программы и опытно-промышленных испытаний полученные результаты анализируются и составляется внутренний нормативный документ предприятия по производству БВР на предельном контуре карьера (технологический регламент). Ожидаемые результаты от внедрения – это обеспечение минимального влияния буровзрывных работ на устойчивость бортов карьера. Повышение безопасности при производстве работ под высокими уступами. Снижение себестоимости производства товарной продукции. Основным конкурентным преимуществом данной разработки является то, что её применение особенно эффективно при увеличении интенсивности горных работ. Также повышается промышленная безопасность за счёт регламентирования производства работ на предельных контурах карьера. Область применения – карьеры с цикличной технологией добычи, разрабатываемые крутопадающие месторождения полезных ископаемых.

В рамках таких НИР проводятся исследования сейсмического действия взрывов, чтобы с одной стороны установить соответствие фактических колебаний и расчётных допустимых колебаний, определённых для исследуемых грунтов на основании данных геологической документации. С другой стороны, по деформационным проявлениям от технологических взрывов в приближении устанавливаются свойства грунтов и определяются примерные зоны развития трещин, межблочных подвижек и остаточных деформаций. Указанная информация служит критерием для выбора тех или иных параметров БВР для включения в программу опытно-промышленных испытаний. Также, в зависимости от свойств грунтов и свойств, применяемых ВВ, определяются параметры зарядов контурных лент при осуществлении экранирования.

ЭФФЕКТ СЕЙСМИЧЕСКОГО ЭХА В АФТЕРШОКОВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯХ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ: СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

А.Д. Завьялов¹, О.Д. Зотов², А.В. Гульельми¹, И.П. Лавров²

¹ - ИФЗ РАН, Москва; zavyalov@ifz.ru

В недавних наших работах мы обнаружили и описали новые, неизвестные ранее закономерности в динамике потока афтершоков [Гульельми, Зотов, 2013; Гульельми и др., 2014; Гульельми и др., 2017]. Одна из них заключается в том, что сильнейший афтершок сильного землетрясения может быть индуцирован поверхностной сейсмической волной, сделавшей оборот вокруг Земли и вернувшейся в эпицентральную зону главного толчка примерно через три часа. Это явление мы назвали «эффект сейсмического эха». Предлагаемая работа посвящена детальному статистическому анализу эффекта кругосветного сейсмического эха по данным мировых и региональных каталогов за длительный период инструментальных сейсмологических наблюдений.

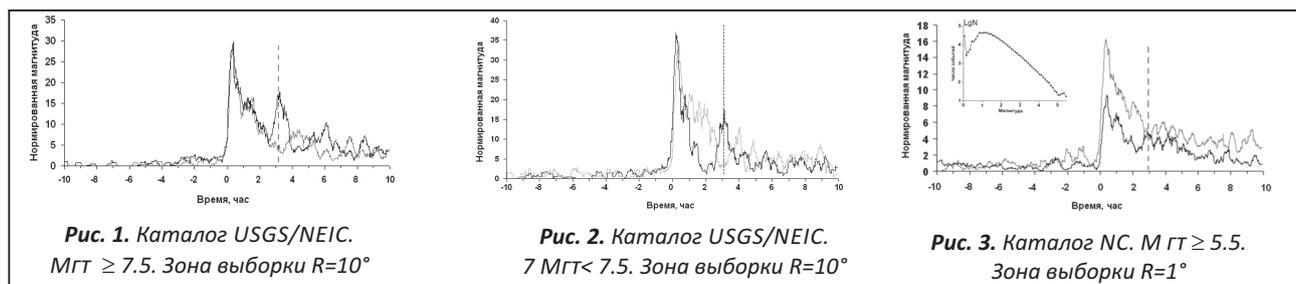


Рис. 1. Каталог USGS/NEIC.
M \geq 7.5. Зона выборки R=10°

Рис. 2. Каталог USGS/NEIC.
7 M < 7.5. Зона выборки R=10°

Рис. 3. Каталог NC. M \geq 5.5.
Зона выборки R=1°

На рис. 1-3 представлены накопленные последовательности нормированных магнитуд повторных толчков. Показан статистический результат выделения эффекта сейсмического эха (черная кривая) в сравнении с событиями, в которых эффект отсутствовал (серая кривая) для главных толчков с магнитудами M > 7.5 (рис. 1), 7 \leq M < 7.5

Для статистического анализа динамики потока сейсмических событий после сильных землетрясений (главных толчков) были использованы выборки из длинных рядов землетрясений, содержащихся в глобальном каталоге USGS/NEIC за период 1973-2014 гг. и региональном каталоге Северной Калифорнии (NC) за период 1968-2007 гг. В глобальном каталоге анализировались последовательности повторных толчков землетрясений с $M \geq 7$, а в каталоге Северной Калифорнии – с $M \geq 5.5$. Мы сосредоточили внимание на афтершоках, которые возникали в первые десять часов после главного толчка. (рис. 2), $M \geq 5.5$ (рис. 3). Вертикальная пунктирная линия на рисунках отмечает время максимума эффекта первого кругосветного эха. Сводка результатов статистического анализа эффекта сейсмического эха представлены в таблице. В работе убедительно продемонстрировано реальное существование эффекта сейсмического эха, обнаруженного нами ранее путем исследования более ограниченных совокупностей землетрясений. Установлены новые, не известные ранее свойства описанного процесса, из которых следует отметить пространственные особенности проявления эффекта - отсутствие сейсмоактивных зон, в которых бы он проявлялся наиболее часто и ярко, и независимость вероятности его возникновения от магнитуды главного толчка (см. таблицу, крайний правый столбец).

Результаты статистического анализа эффекта сейсмического эха

Каталог	Диапазон магнитуд главных толчков	Общее количество главных толчков N_{Σ}	Число главных толчков без афтершоков $N_{\text{БА}}$	Число эпизодов первого эхо-эффекта N_1	Число эпизодов второго и/или третьего эхо-эффекта $N_{2/3}$	Число эпизодов с отсутствием эхо-эффекта N_0	Вероятность ожидания первого эхо-эффекта $P = N_1 / (N_{\Sigma} - N_{\text{БА}})$
USGS/NEIC	$M \geq 7.5$	190	8	72	36	74	0.40
USGS/NEIC	$7.0 \leq M < 7.5$	387	49	120	-	218	0.36
NC	$M \geq 5.5$	48	6	15	-	27	0.36
ВСЕГО:		625	63	207	36	319	0.37

Обнаруженное явление может быть использовано для повышения вероятности прогноза повторного сильного толчка при определении сценария развития сейсмического процесса в эпицентральной зоне произошедшего сильного землетрясения. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 15-05-00491).

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ КОМПОНЕНТ ТЕНЗОРА НАПРЯЖЕНИЙ НА ОБРАЗОВАНИЕ МЕТАНА ИЗ НАГРУЖЕННОГО УГЛЯ

В.Н. Захаров, О.Н. Малинникова

ИПКОН РАН, Москва; olga_malinnikova@mail.ru

Анализ фактических данных о газодинамических явлениях и опыт дегазации угольных пластов в шахтах показывает, что существуют два феномена, связанные с процессами метановыделения из угольных пластов. С одной стороны, известно, что угольные пласты весьма трудно отдают газ и поддаются дегазации. Пластовая дегазация угольных пластов из горных выработок обычно не превышает 15-20% от газоносности пласта, а при использовании различных мер активации удается снять до 40-50% заключенного в пласте метана. С другой - при разработке угольных пластов происходят внезапные выбросы угля и газа, сопровождающиеся выделением метана в количествах многократно превышающих природную газоносность угольных пластов.

Давняя дискуссия о причинах повышенного газовыделения, наблюдаемого при внезапных выбросах угля и газа, периодически возобновляется. Авторам гипотез образования метана из угля при разрушении или дополнительной активационной десорбции метана под действием механоэмиссии горных пород при их разрушении противостоят авторы гипотез утверждающих, что дополнительные количества газа выделяются при дегазации угля и пород вокруг полости выброса. Наши исследования позволили установить, что в процессе внезапного выброса угля и газа основное количество газа, часто существенно превышающее газоносность угольного пласта (в среднем на $3070 \text{ м}^3/\text{т}$), выделяется непосредственно из разрушающегося и выбрасываемого угля. А также, что разрушение

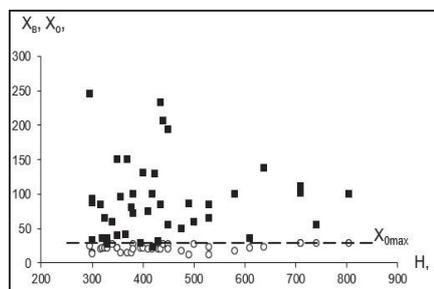


Рис. 1. Метановыделение при газодинамических явлениях на шахтах Кузбасса и Воркуты

угля происходит на внутримолекулярном уровне, молекулы вещества угля теряют значительную часть алифатических CH_3 - групп, оторванные радикалы (CH_3 - группы) химически активны и могут, совместно, с не менее активным атомарным водородом, так же оторванным от «бахромы» молекулы угля, образовывать метан. Образование метана происходит при пластическом разрушении угля в условиях достаточно высоких напряжений, когда главное минимальное напряжение не меньше 5 Мпа, а главное максимальное напряжение превосходит его не меньше, чем в три раза. Количество образовавшегося метана зависит от условий разрушения угля. Особенно интенсивно образуется метан при развязывании внезапного выброса, когда резко падает главное минимальное напряжение, являющееся триггером процесса разрушения, а главное максимальное напряжение не успевает релаксировать, и по их соотношению система оказывается перенасыщена энергией. При сбросе избытка упругой энергии уголь разрушается, в том числе и на молекулярном уровне, то есть с разрывом слабых связей в бахроме.

ВОЗМУЩЕНИЯ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ НАД ЮЖНОЙ АМЕРИКОЙ В СЕЙСМОАКТИВНЫЙ ПЕРИОД ФЕВРАЛЯ – МАРТА 2010.

В.И. Захаров^{1,2}, А.Ф. Хамидуллин¹

¹ - Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва; zvi_555@list.ru

² - ИФА им. А.М.Обухова РАН, Москва

В работе приведены результаты регионального интерферометрического GPS-мониторинга ионосферы во время сейсмической активности в Южной Америке с 18.02. по 23.03. 2010 г. Нами использовались данные наблюдательных сетей IGS и UNAVCO, всего в обработке участвовали 56 станций, которые дали свыше 47 тыс. часов индивидуальных наблюдений обоих фаз навигационных сигналов с разрешением 30 сек. В указанный период получено, что крупные землетрясения с магнитудой более 6 дают статистически значимый отклик на ионосферных высотах, заключающийся в резком (более чем на выборочную дисперсию) уменьшении величины параметра α степенного спада спектра S неоднородностей: $S \sim k^\alpha$ (k - волновой вектор). Вероятно, это связано с дополнительной волновой турбулизацией ионосферной плазмы над сейсмичным районом. Источниками волновых возмущений могут быть различные процессы, по времени совпадающие с подготовкой землетрясения или событиями после него (афтершоками). Поскольку отклик ионосферы на геофизические события принято рассматривать как суперпозицию различных процессов разной природы, то в сейсмических областях возможно триггерное или параметрическое «раскачивание» ионосферы циклом слабых землетрясений – именно так можно интерпретировать некоторые наблюдаемые в эксперименте явления.

Особо стоит вопрос о природе и типе волноподобных возмущений, детектируемых в верхней атмосфере методами GPS-интерферометрии. В работе исследованы характеристики таких возмущений – периодики, величины скорости и направления распространения структур. Получено, что по ряду признаков на ионосферных высотах методом GPS-интерферометрии выделяются акустико-гравитационные волны. Возникающие в нижней атмосфере волновые возмущения распространяются до ионосферных высот, на которых волна модулирует электронную плотность; именно эти пространственно-временные колебания электронной концентрации определяются прецизионными радиофизическими методами и интерпретируются в нашей работе как волновые возмущения. Источником волнового возмущения в нижней атмосфере может быть, таким образом, любое ограниченное в пространстве и периодическое или широкополосное воздействие на давление, температуру или плотность атмосферы. Эти возмущения, при определенных условиях, достигают ионосферных высот. Отметим, что скорости выделенных нами волновых структур имеют широкий диапазон – от нескольких сотен м/с, что соответствует в целом термодинамическим зависимостям скорости звука от высоты, до скорости поверхностных волн Рэлея несколько км/сек.

Проведенный мониторинг показывает, что сейсмически активные районы являются источниками акустико-гравитационных волн не только во время, но также до и после активной фазы землетрясения. Если говорить о периоде времени до землетрясения, то источником волновых структур является не столько будущий эпицентр, но целая область подготовки землетрясения. Так, часть волновых структур имеет своим источником (в пределах погрешности методики) места эпицентров самих землетрясений не только во время самого события или после него, но и до него на протяжении 2-3 дней. Однако значительно больше (более чем в 10 раз) структур имеют своими источниками всю область подготовки сейсмического события. Отметим, что волновые структуры, обнаруженные методом GPS-интерферометрии на выбранной наблюдательной сети, географически связаны с проявлениями динамики крупных атмосферных явлений (таких, как тайфуны или циклоны) или непосредственно с орографическими возмущениями. Например, возможна генерация акустико-гравитационных волновых возмущений горными массивами на островах или на самой береговой линии при ее обтекании воздушными массами циркулирующей атмосферы. Указанные явления в ряде случаев могут затруднять интерпретацию всех событий, проявляющихся в ионосфере и выделяемых методами радиоинтерферометрии над регионом мониторинга. Более того, ионосфера является открытой системой, поэтому гео- и гелиомагнитные возмущения также затрудняют определение источников волновых возмущений, связанных с различными литосферно-атмосферными событиями.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ СКОЛЬЖЕНИЯ МОДЕЛЬНОГО РАЗЛОМА ПРИ ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

В.А. Зейгарник, В.А. Новиков, В.Н. Ключкин

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва; novikov@ihed.ras.ru

Представлено описание экспериментальной пружинно-блочной установки, моделирующей сейсмический цикл (накопление и сброс сдвиговых напряжений в геологическом разломе земной коры) при температуре в очаге землетрясения до 500°C, что соответствует глубине расположения эпицентра до 10-15 км. Электромеханический привод пружинно-блочной модели (рис. 1) обеспечивает медленное сдвиговое нагружение контактной зоны между подвижным и неподвижным блоками, имитирующими борта разлома земной коры, со скоростью 0,15 мкм/с, а также сдвиговое усилие до 1 кН. Нормальное давление в контактной зоне до 1 бар обеспечивается верти-

кальной нагрузкой подвижного блока. Электрический внутренний нагрев подвижного блока с системой автоматического регулирования обеспечивает температуру контактной зоны до 500° с точностью до 5%, что позволяет проводить исследования сейсмического цикла при различных постоянных температурах. По аналогии с натурным геологическим разломом контактная зона между блоками заполняется различными гранулированными материалами с известным дисперсным и структурным составом. В результате экспериментов получено, что нагрев контактной зоны в диапазоне от 200 до 400° С приводит к упрочнению дисперсного материала-заполнителя и увеличению критического сдвигового напряжения, при котором происходит срыв подвижного блока (лабораторное "землетрясение") на 30-40%. При использовании в качестве заполнителя контактной зоны ультрадисперсного талька с размером частиц <1 мкм обнаружен эффект его упрочнения и при росте температуры от 250 до 300° С - перехода от асейсмичного скольжения (крипа) к прерывистому скольжению (накоплению и резкому сбросу сдвиговых напряжений, рис. 2), что может служить объяснением возникновения событий медленного скольжения на ряде разломов с зонами крипа (типа Сан-Андреас), в которых обнаружен тальк.

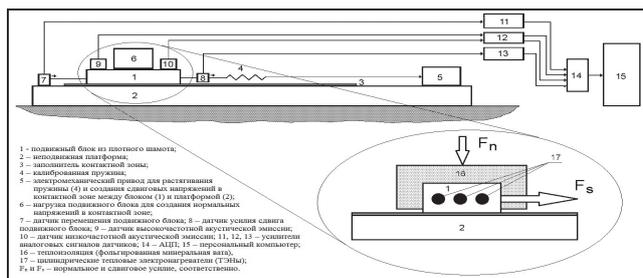


Рис. 1. Схема системы нагрева контактной зоны пружинно-блочной модели геологического разлома

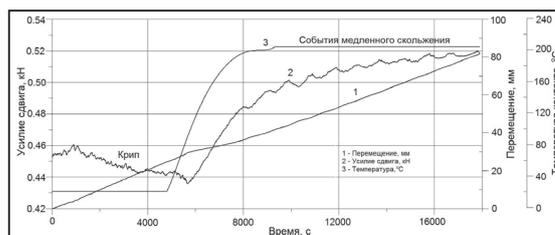


Рис. 2. Влияние температуры контакта на режим его деформирования. Заполнитель контакта: тальк, размер частиц < 10 мкм. Нормальное напряжение $\sigma_n = 40$ кПа. Жесткость пружины 6,24 Н/мм

ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СРЕДЫ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА В ЛАБОРАТОРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Е.В. Зенченко¹, А.К. Айгожиева², Н.А. Барышников¹, П.Е. Зенченко¹, М.А. Тримонова¹, С.Б. Турунтаев¹

¹ - Институт динамики геосфер РАН, Москва

² - Московский физико-технический институт, Москва

Технология гидроразрыва пласта (ГРП) является одним из наиболее эффективных методов повышения продуктивности разработки месторождений углеводородов. Для успешного применения этой технологии необходим прогноз распространения трещины ГРП, основанный на данных о напряженно-деформированном состоянии (НДС) среды, как основном факторе, определяющим направление её распространения. Проведение исследований по влиянию НДС на распространение трещины ГРП на месторождениях углеводородов требует больших материальных затрат, поэтому результаты таких исследований немногочисленны и не всегда доступны. Вследствие этого, проведение экспериментов по ГРП малого масштаба в контролируемых лабораторных условиях является распространенной альтернативной практикой.

Эксперименты по распространению трещины ГРП проводились на установке трехосного нагружения, состоящей из двух круговых оснований и кольца, закрепленного между ними. Основания между собой стягивались шпильками. Диаметр образованной таким образом рабочей камеры составлял 430 мм при высоте 70 мм. На внутренней боковой поверхности кольца располагались четыре тонкостенные медные камеры попарно гидравлически соединённые между собой. Путем закачки газа или жидкости в эти камеры обеспечивалось боковое (горизонтальное) нагружение. В открытую установку заливался гипсовый раствор с добавкой 10% цемента. Затем, после затвердевания и необходимой выдержки, отлитый образец накрывался резиновой разделительной диафрагмой и закрывался верхним основанием. В пространство между верхним основанием и диафрагмой закачивалась жидкость, давление которой обеспечивало вертикальное нагружение образца и поддерживалось постоянным при помощи буферного объема со сжатым газом. Проведенные расчеты и непосредственные измерения деформаций свидетельствуют о достаточно однородном напряженно-деформированном состоянии среды в центральной области образца. Гидроразрыв осуществлялся путём закачки рабочей жидкости в скважину в центре образца с постоянным расходом.

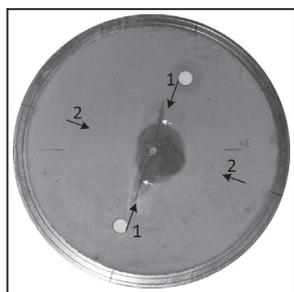


Рис. 1. Фотография образца после проведения двух последовательных ГРП. Светлые стрелки указывают на концы трещин после первого ГРП

Фотография образца после проведения одного из экспериментов приведена на рис. 1. В этом эксперименте, как и ожидалось, трещина ГРП проросла в направлении действия максимального сжимающего напряжения (1). Затем, при нагружении образца другой парой камер (направление 2),

рост трещины ГРП был возобновлён. При этом можно заметить, что трещина отклонилась от своего первоначального направления в сторону нового направления сжимающих напряжений. Проведенные эксперименты показывают, что разработанная лабораторная методика проведения ГРП позволяет управлять напряженно-деформированным состоянием среды и исследовать его влияние на распространение трещины гидроразрыва.

ВЛИЯНИЕ НАПОРНЫХ, НАСЫЩЕННЫХ ГАЗАМИ ФЛЮИДОВ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СРЕДЫ ОБРАЗОВАНИЯ ОРОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА

Т.М. Злобина, В.А. Петров, В.Ю. Прокофьев, А.А. Котов

ИГЕМ РАН, Москва; tatiana1946@yandex.ru, vlad243@igem.ru

Изучены орогенные гидротермальные Au-Q месторождения, локализованные в зонах сдвигов вдоль глубинных разломов [Злобина, Петров, Прокофьев и др., 2016], а также, размещенные в зоне надвигов [Котов, Прокофьев, Злобина, Мурашов, 2016]. Выявлено, что миграция флюидов из области их генерации (глубина в табл.) в сферу рудоотложения происходила в сейсмическом режиме. Исследования солидарного развития НДС и флюидных систем проведены по оценкам изменчивости параметров, отражающих фазовые состояния палео-сейсмического и флюидного режимов. Переменные величины параметров деформаций - это изменяющиеся в трехмерном пространстве ориентировки осей $A, B, C_{\text{геол}}$ (соответствуют $\approx T, B, P_{\text{сейсм}}$), восстановленные по Q-Au-рудным прожилкам. Изменчивость, а также нестабильность поля напряжений определялись по оценкам детерминантов и асимметрии тензоров-девиаторов. Параметры флюидных систем получены при исследовании на установке THMSG-600 "Linkam" индивидуальных флюидных включений в золоторудном кварце, захваченных в процессе минералообразования (табл.).

Вариации параметров рудообразующих газ-гидратных флюидных систем

Месторождение	Глубина (км)	P (кбар)	Плотность (г/см ³)	T ^o C	CO ₂ /CH ₄ (моль/кг р-ра)	Родангит/Рисол	C солей (мас%, экв. NaCl)
Вернинское (надвиги)	8-9	0.72-2.59	ф0.87-1.05 г0.54-0.92	246-346	2.3-8.6	10.9-24.8	4.0-6.1
Урэх (сдвиги)	11	1.12-3.0	ф0.96-1.08 г0.7-1.01	289-361	6.7-9.04	13.1-23.7	2.5-9.1
Ирокинда (сдвиги)	15-17	1.9-4.24	ф0.87-1.07 г0.88-1.09	315-453	5.5-1495.04	7.9-57.7	Растворы 4.3-9.0 Рассолы 16.0-46.3

При аналитическом сравнении изученных орогенных месторождений (табл.) получены новые данные о влиянии напорных газо-насыщенных флюидов на НДС среды. На всех месторождениях выявлены однотипные процессы, отражающие триггерное влияние флюидов на процесс разрушения. Хрупкие деформации сопровождалась сбросом давления на ~2 кбар флюидного режима, снижением плотности как углекислотно-водного флюида, так и его газовой фазы, изменением T^oC, что яв-

ляется реакцией флюидной системы на дилатансионную декомпрессию при заполнении флюидами вакуумированных трещинных зон. Процессы фазовой сепарации флюидов на газ и водно-солевой раствор, контролировавшие скорость периодического нарастания давления в системе, согласуются с неустойчивым полем напряжений переменного сжатия-растяжения. Периодическая дегазация флюидной системы в режиме декомпрессионного кипения вызывала циклический перепад давлений, соответствующий изменениям параметров НДС. Однако на Вернинском месторождении установлена только маятниковая инверсия осей $\sigma_2, \leftrightarrow \sigma_3$, вызвавшая возвратные деформации с качанием плана ВС вокруг оси А, тогда как на Уряхе и Ирокинде выявлены признаки перестройки одноосного поля напряжений переменного сжатия-растяжения в вихревое, обусловившее деформации центроидного типа. На Уряхе перестройка поля напряжений полностью завершилась только в тех блоках, где произошло резкое нарушение химического равновесия флюидной системы, а на Ирокинде она завершилась полностью во всем объеме рудного поля и сопровождалась инверсией щелочного режима флюидов на кислотный и максимальной дегазацией флюидной системы. Результаты аналитического сопоставления результатов привели к выводу о том, что процессы перестройки сейсмического поля напряжений "запускаются" при поступлении в сейсмоактивную динамическую систему большого объема напорных, насыщенных газами флюидов под давлениями не менее 3 кбар. Такие процессы завершаются полностью при высоких содержаниях в растворах солей и при очень больших вариациях соотношений концентраций газов (CO₂/CH₄) в растворах, регулирующих окислительно-восстановительный потенциал флюидной системы, а также при интенсивной дегазации самой флюидной системы.

О НОВЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ДИНАМИКИ ПОТОКА АФТЕРШОКОВ

О.Д. Зотов², А.Д. Завьялов¹, А.В. Гульельми¹, И.П. Лавров²

¹ - ИФЗ РАН, Москва

² - Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, пос. Борок, Ярославская обл.; ozotov@inbox.ru

Данная работа продолжает цикл наших исследований по изучению особенностей динамики потока афтершоков. В качестве информационной базы использовался мировой каталог землетрясений USGS с 1973 по 2014 годы. Рассмотрены короткие интервалы времени – не более 10 часов после главного толчка и расстояния от эпицентра главного толчка - до 4 град. Для анализа использован метод наложения эпох. Главные толчки выполняли функцию репера для синхронизации последовательности повторных толчков. При этом каждому главному толчку

приписывалось условное время, равное нулю. Была исследована зависимость числа афтершоков от расстояния до эпицентра главного толчка. Показано, что максимум числа афтершоков наблюдается на некотором (от 10 до 30 км) расстоянии от эпицентра, причем это расстояние пропорционально магнитуде главного толчка. Показано также, что расстояние максимума числа повторных толчков от эпицентра главного толчка не зависит от времени. Можно предположить, что расстояние от максимума числа афтершоков до эпицентра может служить характеристикой размера очаговой зоны. Обнаружено, что на рассматриваемом интервале времени число повторных толчков N обратно пропорционально расстоянию от эпицентра R и распределено по степенному закону $N \sim 1/R^n$, аналогично закону Омори убывания числа афтершоков во времени. Показано, что на интервале 10 час после репера, нет никакой связи между расстоянием афтершока от главного толчка и интервалом времени афтершока после главного толчка. Таким образом, зависимость “чем дальше, тем позже” не выполняется. Можно предположить, что главный толчок возбуждает всю очаговую зону одновременно. Расположение эпицентров афтершоков в координатах “расстояние от репера – время после репера” представляет собой хаотическое распределение. *Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 15-05-00491.*

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ МАГНИТОСФЕРЫ В ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

О.Д. Зотов, Б.И. Клайн

Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, пос. Борок, Ярославская обл.; ozotov@inbox.ru

Работа посвящена исследованию особенностей в динамике активности земной магнитосферы. Для анализа использованы ряды суточных значений чисел Вольфа, магнитосферной активности (Ар-индекс) и различных параметров солнечного ветра за период с 1932 по 2000 годы. Показано, что динамика магнитосферной активности содержит особенности, которые не наблюдаются в динамике параметров солнечной активности и межпланетной среды. Отмечено, что в каждом из 11-летних циклов динамика спектральной плотности Ар-индекса разбивается на два паттерна. В первом - динамика демонстрирует хаотическое поведение (шум в широкой полосе в максимуме солнечной активности), во втором - периодическое (27-дневная периодичность в минимуме солнечной активности). Обнаружен эффект резкого перехода из хаотического состояния в периодическое и обратно - триггерный режим в динамике магнитосферы.

В данной работе сделана попытка ответить на следующие вопросы. Почему наблюдается подобие триггерно-эффекта в динамике Ар-индекса? Существует ли внешний параметр, динамика которого совпадала бы с динамикой Ар-индекса? Чем определяется триггерный режим - процессами на Солнце, в солнечном ветре или внутренней динамикой магнитосферы? Мы рассматриваем магнитосферу как находящуюся в метастабильном состоянии динамическую систему, на которую действует внешняя сила. Эта сила состоит из квазипериодических и хаотических компонент. Влияние внешней силы на такую систему может приводить к переключениям между состояниями системы. Показано, что именно хаотическая компонента солнечной активности определяет режим переключения от хаоса к порядку в динамике Ар-индекса. *Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-05-00056).*

ЭКЗОГЕННОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЗЕМНОЙ КОРЕ

А.В. Зубков, И.В. Бирючев, К.В. Селин, С.В. Сентябов

ИГД УрО РАН, Екатеринбург; sentyabov@mql.ru

С 1998 года ИГД УрО РАН ведёт работы по исследованию изменения во времени параметров напряжённо деформированного состояния (НДС) массива горных пород. Большая часть экспериментальных наблюдений ведётся на подземных геодинимических полигонах, расположенных в рудниках, преимущественно, уральского региона. Исследования позволяют анализировать события вдоль меридиана 60°ВД на интервале 900 км. Большая площадь, охваченная исследованиями, и значительный объём экспериментальных данных (более 2000 измерений), накопленных с 1998 по 2017 гг., позволяют утверждать, что изменение параметров НДС происходит циклично. На текущий момент из зафиксированных циклов самым продолжительным является 13-и летний цикл пульсации, в течение которого максимальная относительная деформация достигала значения $\epsilon = 2 \cdot 10^{-4}$. Результаты исследования приведены в Таблице.

Таблица 1. Результаты измерения относительной деформации массива горных пород $\epsilon \cdot 10^4$ на рудниках Урала

Год	Азимут	*	I	II	III	IV	V	VI	ε _{ср}
1998	T	-2,13	-1,87	-	-	-1,88	-1,99	-1,97±0,12	
	T	-0,72	-0,50	-	-1,94	-0,55	-0,60	-0,99±0,67	
	Г	-	-0,64	-	-2,02	-	-	-	
2001	T	0	0	0	0	0	0	0	
	T	-0,71	-	-0,22	-0,24	-0,16	-	-	
	Г	-0,15	-0,17	-	-	-0,36	-0,79	-0,36±0,2	
2003	Б	-0,19	-0,48	-	-0,40	-	-0,32	-	
	Г	-	-	-0,50	-	-	-	-	
	Г	-	-	-	-	-	-	-	
2007	К	-0,88	-	-0,61	-0,75	-0,50	-	-	
	T	-0,85	-0,36	-	-	-0,61	-1,06	-0,71±0,17	
	Б	-	-0,60	-	-0,75	-0,72	-0,83	-	
2010	Г	-	-0,62	-	-0,85	-	-	-	
	К	-1,85	-	-1,24	-1,24	-1,38	-	-	
	T	-1,03	-0,43	-	-	-1,05	-1,32	-1,2±0,21	
2013	Б	-	-1,05	-	-1,10	-1,11	-1,09	-	
	Г	-	-1,02	-	-1,17	-1,15	-1,15	-	
	К	-1,28	-	-0,70	-0,53	-0,85	-	-1,04±0,24	
2016	T	-0,17	-	-	-1,00	-0,26	-1,19	-	
	Б	-	-1,20	-	-	-1,26	-1,21	-	
	Г	-	-0,88	-	-1,07	-	-1,21	-	
2016	К	-1,23	-	-1,00	-1,04	-0,81	-	-1,14±0,16	
	T	-1,25	-0,80	-	-	-1,14	-1,17	-	
	Б	-	-1,22	-	-1,24	-1,23	-1,20	-	
	Г	-	-1,10	-	-1,20	-	-1,41	-	

* Измерения проводились на рудниках расположенных вблизи городов:

К – Красноуральск; Т – Нижний Тагил; Б – Березовский; Г – Гай

Направления базисов: I – 0°- 9°; II – 20°-30°; III – 45°- 75°; IV – 80°- 90°; V – 125°- 135°; VI – 156°-160°.

Расчёты показывают, что земная кора, а значит, вся Земля деформируется равномерно по всем направлениям [Зубков, 2015]. Такая объёмная относительная деформация вызывает в земной коре изменение НДС массива горных пород на величину от 10 до 20 МПа ($s = (e^* E_m)/(1-2\mu)$, при $E_m \approx 0,5 \cdot 10^5$ МПа, $\mu = 0,2$), в некоторых местах изменение достигает 40 МПа, что является главной причиной сейсмичности, инициируемой периодически. В итоге наносится значительный ущерб подземным конструкциям и объектам, расположенным на поверхности, таким как плотины высоконапорных ГЭС. Известно, что линейные и энергетические параметры Солнца изменяются с различной периодичностью от нескольких часов до сотен лет. То есть, изменение параметров Солнца происходит циклично. Также пульсируют более 46000 звёзд в нашей галактике, которые внесены в астрономические каталоги.

Сравнение изменения параметров относительной деформации земной коры (Земли) и Солнца во времени, выявило совпадение изменений в циклах различной продолжительности. Значит нельзя отрицать наличие внешних (экзогенных) факторов одинаково влияющих на Солнце и Землю, а также на другие планеты и звёзды. К таким экзогенным факторам следует отнести астрофизические поля в космосе, влияние которых может вызывать деформацию звёзд и планет.

ТЕХНОЛОГИЯ ПОИСКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ НА ОСНОВЕ РЕГИСТРАЦИИ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ФЛЮИДНЫХ СИСТЕМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НИХ ЭНЕРГИИ РЕЗОНАНСОВ ГРАВИТАЦИОННЫХ ПРИЛИВОВ

А.А. Кабанов¹, В.Г. Сибгатулин², В.М. Агафонов^{3,4}

¹ - Сибирский федеральный университет, Красноярск; es_ropr@mail.ru

² - СКТБ «Наука» ИВТ СО РАН, Красноярск; weller86@inbox.ru

³ - МФТИ, Долгопрудный

⁴ - ООО «Р-сенсорс», Долгопрудный

Предложена технология прямых поисков нефтегазовых залежей – флюидная резонансная сейсморазведка (ФРС) на основе регистрации приливных воздействий. Принципиальное отличие ФРС от известных технологий так называемой «пассивной сейсморазведки» (АНЧАР, НЧС) заключается в том, что если в «пассивной сейсморазведке» конкретный источник низкочастотных аномалий НГЗ неизвестен, то технология ФРС базируется на реальном и стабильном источнике воздействия на НГЗ – резонансах приливов. Резонансы гравитационных приливов вызывают стоячие волны в нефтегазовых залежах. Это позволяет устойчиво регистрировать низкочастотную составляющую (от 0,1 до 5,0 Гц) в спектре на фоне сильных помех без использования искусственных источников возбуждения. Резонансы приливов влияют на НДС геологической среды и усиливают эмиссию углеводородных газов (метана, пропана) из НГЗ, что повышает достоверность прямого прогноза. При проектировании работ по технологии ФРС, время резонансов предварительно рассчитывается. При этом наряду с известными типами приливных воздействий учитывается также влияние колебаний барицентра. Низкочастотные колебания залежей при резонансах гравитационных приливов длятся до одного до трёх суток. В течение лунного месяца (28–29 суток) обычно фиксируется не менее трёх сильных резонансов, что позволяет для поиска залежей ограничить регистрацию сейсмических шумов интервалом от 3 до 5 суток.

Технология ФРС для прямого прогноза залежей углеводородов применима в различных горно-геологических и климатических условиях – от тундры до горно-таежной местности в летнее и зимнее время. Она отличается технологической простотой: низкочастотные сейсмоприемники-велоциметры (0,1–10 Гц) устанавливаются на исследуемой площади на срок от 3 до 5 суток с густотой, соответствующей детальности решаемой задачи (обычно на площади 200 квадратных километров достаточно установить 100 приборов, что позволит контролировать изменчивость коллектора и флюидонасыщение с детальностью ± 1 км). Для повышения надёжности регистрации стоячих волн в НГЗ и повышения производительности в стадии разработки находится регистрирующий полевой модуль, содержащий сейсмоприемник типа СМЕ (Z компонента), цифровой регистратор с блоком GPS для привязки координат и аккумулятором с ёмкостью, обеспечивающей регистрацию в течении 4-6 суток. Целесообразно также использовать аппаратуру ЕИЭМПЗ для контроля времени возникновения резонансов и газоанализаторы углеводородных газов (метан, пропан) для подтверждения природы аномалий сейсмических шумов.

ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННЫХ РАЗРУШЕНИЙ ГОРНЫХ ПОРОД

П.А. Казначеев¹, З.-Ю.Я. Майбук¹, А.В. Пономарев¹, В.Б. Смирнов^{1,2}, Н.Б. Бондаренко^{1,2}

¹ - ИФЗ РАН, Москва; p_a_k@mail.ru, rim@ifz.ru, avp@ifz.ru

² - МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва; vs60@mail.ru, nb.bondarenko@physics.msu.ru

Исследовались микроразрушения в образцах горных пород, стимулированные термическим воздействием. Лабораторная установка обеспечивала контролируемый нагрев (максимально – до 750°C) и охлаждение исследуемого образца. Регистрировались импульсы термостимулированной акустической эмиссии (ТАЭ) с помощью пьезо-

электрического датчика Panametrics V103 и акустического волновода, подведенного к одному из торцов образца. Отличительной особенностью установки является использование стабильного площадного контакта волновод-образец за счет использования прослойки расплавленного индия (In). Всего было исследовано 27 образцов горных пород различного состава и структуры (гранит разной зернистости, песчаник, кварцит, мрамор, доломит, пирофиллит, кварц), и несколько контрольных образцов металла (сталь, латунь). На каждом цикле нагрев-остывание выделяются несколько стадий развития микроразрушений, интенсивность ТАЭ для которых определяется следующими эффектами: термический аналог эффекта Кайзера [Шкуратник, Вознесенский, Винников, 2015], при котором интенсивность ТАЭ при повторном нагреве возрастает при превышении максимальной температуры предыдущих нагревов; увеличении интенсивности ТАЭ около 574°C (размытый фазовый $\alpha \leftrightarrow \beta$ переход кварца [Соболев, Пономарев, Никитин, Балагуров, Васин, 2004]); влияние величины макроскопического нестационарного температурного градиента на величину ТАЭ [Browning, Meredith, 2016].

Также было обнаружено два не описанных ранее явления - длительная, в течение нескольких суток акустическая эмиссия после остывания образца до комнатной температуры ("холодная" ТАЭ) и модуляция интенсивности ТАЭ изменением скорости нагрева. Первое явление может рассматриваться как некоторый релаксационный процесс в образце после инициирующего (триггерного) воздействия (нагрев до большой температуры, высокая скорость остывания, кристаллизация In или большая предшествующая интенсивность микроразрушений). Спад интенсивности "холодной" ТАЭ не описывается экспоненциальным или обратным степенным законом; выяснение механизма инициации требует более тонкого анализа. Модуляция интенсивности ТАЭ скоростью изменения температуры может говорить о влиянии временных вариаций пространственного микроградиента температуры на микроразрушения, что, согласно некоторым теоретическим исследованиям [Molaro, Byrne, Langer, 2015], не ожидалось.

Учет указанных эффектов может быть важен при анализе состояния горных пород, прошедших остывание в условиях большого давления. Последующее нагревание таких пород изменяет их петрофизические характеристики, что может быть выявлено по исследованию ТАЭ. Исследование ТАЭ также может дать информацию об изменении состояния магматических пород, взаимосвязи микро- и макроразрушений, особенностях очагов землетрясений, формировании траппов и др.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ МЕХАНОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЯХ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

А.Н. Камшилин

ИФЗ РАН, Москва; kamshilin@ifz.ru

Представлены результаты нескольких натуральных экспериментов, в ходе которых изучались электрические отклики на вибровоздействие. Было обнаружено, что вибровоздействие в присутствии стороннего электрического поля в земле может привести к возникновению электрических сигналов на комбинационных частотах $f_n = f_{cm} \pm n f_{st}$, где f_{cm} - частота стороннего электрического поля, f_{st} - частота вибровоздействия, n - натуральное число. Стороннее электрическое поле в нашем случае - промышленная помеха с частотой 50 Гц. Эксперименты проводились в разных регионах (Белоруссия, Гомельская, Московская области, Волоколамский район) с использованием различных способов возбуждения первичных сигналов и регистрации вторичных сигналов (сейсмических и электрических откликов среды).

Электрические сигналы на комбинационных частотах возникали по причине изменения электрических параметров среды, активных (R) и (или) реактивных (C) под влиянием упругой волны (сейсмоэлектрический эффект первого рода [Иванов, 1949]). Из этого можно сделать вывод, что в данном случае мы имеем дело с нестационарной средой, параметры R и (или) C которой зависят от времени, то есть с параметрической средой. В следующей серии экспериментов мы регистрировали изменения электрических параметров среды при вибровоздействии. В качестве измерительного прибора использовался электровариометр [Волкова, Камшилин, 1988], который позволял одновременно регистрировать изменения активной и реактивной компонент электросопротивления. Оказалось, что абсолютная величина изменения реактивной составляющей при вибровоздействии превышает изменение активной составляющей в семь и более раз. Это притом, что номинальное значение реактивной составляющей примерно на порядок меньше, чем активной.

Суммируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что в нашем случае параметрические явления были вызваны, в основном, изменениями реактивной составляющей электросопротивления земли. Но, как известно, параметрические реактивные элементы могут запасать и отдавать энергию, и при определенных условиях возникает усиление и даже генерация колебаний. Обсуждается возможность возникновения таких ситуаций, приведено описание экспериментов и полученные результаты.

ИЗУЧЕНИЕ МЕТЕОРНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПО КОМБИНИРОВАННЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ

А. П. Карташова¹, Ю. С. Рыбнов², Д. О. Глазачев², О. П. Попова², Г. Т. Болгова¹

¹ - Институт астрономии РАН, Москва; akartashova@inasan.ru

² - Институт динамики геосфер РАН, Москва

Взаимодействие метеорных тел с атмосферой приводит к генерации как оптического (метеоры), так и акустического (импульсы давления) излучения. Большинство метеорных частиц не достигают земной поверхности, и их свойства (масса, размер и т. д.) оцениваются по данным наблюдений с использованием целого ряда предположений и моделей взаимодействия с большой неопределенностью. Одновременные комбинированные наблюдения метеоров позволят сопоставить оценки параметров метеороидов, полученные по разным наблюдательным данным, уточнить модели взаимодействия частиц с атмосферой.

Комбинированные (оптические и акустические) метеорные наблюдения были организованы Институтом астрономии РАН (ИНАСАН) и ИДГ РАН в 2014 г. и продолжены в 2016 г. Базисные оптические наблюдения проводились на обсерватории Звенигородская (ИНАСАН) и геофизической обсерватории «Михнево» (ИДГ РАН). Непрерывный мониторинг инфразвука осуществляется на геофизической обсерватории "Михнево" ИДГ РАН и на Звенигородской обсерватории. Колебания давления регистрировались микробарометрами, чувствительных в диапазоне частот 0.001–20 Гц. *Работа была поддержана программой Президиума РАН № 7.*

ЭФФЕКТЫ КОГЕРЕНТНОГО ПОВЕДЕНИЯ ФОНОВОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА В СВЯЗИ С СИЛЬНЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ (НА ПРИМЕРЕ КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА)

В.А. Касимова¹, Г.Н. Копылова¹, А.А. Любушин²

¹ - Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая Геофизическая служба РАН», Петропавловск-Камчатский

² - ИФЗ РАН, Москва

В работе представлены результаты исследования пространственно-временного распределения и когерентного поведения параметров фонового сейсмического шума (ФСШ) на Камчатке в 2011–2016 гг. на основе метода, предложенного д.ф.-м.н. А.А. Любушиным, и непрерывных записей ФСШ на сети широкополосных сейсмических станций ФИЦ ЕГС РАН (всего 21 станция). В качестве параметров ФСШ использовались среднесуточные величины обобщенного показателя Херста α^* , ширины носителя спектра сингулярности $\Delta\alpha$, вейвлетной спектральной экспоненты β и минимальной нормализованной энтропии вейвлет-коэффициентов En , рассчитанные для каждой станции [Любушин, 2013; Любушин, Копылова, Касимова, Таранова, 2015]. Оценка изменчивости поля ФСШ производилась с помощью набора карт пространственно-временного распределения статистик шума на различных временных масштабах и графиков изменения во времени их медианных значений, оцениваемых по всем станциям в заданных временных окнах различной длины. Рассмотрены особенности пространственно-временного распределения параметров ФСШ в периоды сильных локальных землетрясений 28 февраля 2013 г., $M = 6.8$; 24 мая 2013 г., $M = 8.3$; 30.01.2016 г., $M = 7.2$. Обнаружено, что за 3–6 месяцев перед указанными землетрясениями наблюдались закономерные изменения фонового шума, проявляющиеся в уменьшении величин α^* , $\Delta\alpha$, β и в увеличении En . Высокие значения En и понижение значений других статистик свидетельствуют об уменьшении числа высокоамплитудных вариаций во временных рядах шума и о потере ими мульти-фрактальных свойств на стадиях подготовки сильных землетрясений. Характер поведения параметров α^* , $\Delta\alpha$, β и En перед сильными землетрясениями на Камчатке соответствует их вариациям в периоды подготовки сильнейших землетрясений Японии 2003–2011 гг. [Любушин, 2013; 2012].

Методика изучения когерентного поведения ФСШ включала в себя: 1 - разбиение сейсмической сети на три группы станций (северная, центральная и южная), выделенных в соответствии с конфигурацией сети и основными тектоническими структурами Камчатки [Кожурин, Пономарева, Пинегина, 2008]; 2 - вычисление ежесуточных временных рядов медианных значений параметров шума α^* , $\Delta\alpha$, β и En от каждой группы станций; 3 – построение частотно-временных диаграмм эволюции спектральной меры когерентного поведения четырехмерных рядов параметров шума $v(\tau, \omega)$, где τ - временная координата правого конца скользящего временного окна, ω - частота, для всей сети станций и выделенных трех групп станций; 4 – анализ частотно-временных диаграмм эволюции $v(\tau, \omega)$ и выделение интервалов времени и частотных полос проявления максимальных значений $v_{\max}(\tau, \omega)$, показывающих увеличение когерентности в изменениях всех статистик шума. Обнаружено, что для всей сети станций максимальный эффект повышенной когерентности в изменениях статистик шума в диапазоне периодов 4–5 суток соответствует времени подготовки и реализации двух сильных землетрясений 2013 г. с $M = 6.8$ и $M = 8.3$. При этом для северной группы станций эффекты повышенной когерентности в изменениях ФСШ не наблюдались; для центральной группы станций выделяются всплески когерентности на интервалах времени, соответствующих времени подготовки и реализации сейсмической активизации 2013 г. и землетрясению 2016 г. с $M = 7.2$; для южной группы станций выделены слабые всплески повышенной когерентности на интервале времени с середины ноября 2012 по конец июня 2015 гг.

Интерпретация эффектов повышенной когерентности в изменениях ФСШ проводится с учетом тектонического строения района, конфигурации сети, сезонных вариаций шума и возможного влияния активного вулканизма, слабой локальной сейсмичности, берегового эффекта.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАЗРЫВОВ В ПОВРЕЖДАЕМЫХ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИХ СРЕДАХ

А.Б. Киселев, П.П. Захаров

Работа посвящена численному моделированию в двумерной плоской постановке динамики среды (в частности, нефтегазонасыщенного пласта) вблизи скважины при внезапном снятии нагрузки в скважине. Для описания поведения среды используется модель повреждаемой термоупруговязкопластической среды с двумя скалярными параметрами поврежденности, описывающими как объемное (вязкое), так и сдвиговое разрушение [Киселев, Юмашев, 1990; 1992; Киселев, 1998]. В качестве критерия начала макроразрушения материала используется критерий предельной удельной диссипации [Киселев, Юмашев, 1990], а для явного построения берегов макроскопического нарушения сплошности материала (распространяющихся трещин) применяется алгоритм расщепления лагранжевой расчетной сетки [Киселев, Захаров, 2013]. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 15-01-01541а, № 16-29-15076 офу_м).

ВОЗМОЖНОСТЬ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ТЕХНОГЕННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

С.Б. Кишкина

ИДГ РАН, Москва

Обеспечение геомеханической безопасности ведения горных работ при заданных технологических условиях добычи остается одной из основных задач эффективного освоения месторождения.

Обобщение сведений о техногенных землетрясениях [Адушкин, Кишкина, Кочарян, 2017] – строении гипоцентральных зон, инициирующих факторах, механике формирования разных мод скольжения по разломам, сейсмической эффективности и т.д. – подтверждает существование двух основных типов техногенных землетрясений: слабых, источники которых по пространственным и временным параметрам явно следуют зонам производства горных работ, и более крупных, источники которых вызваны подвижками по разломным зонам [Gibowicz, Kijko, 1994 и др.]. Закономерности распределения таких крупных (с магнитудой $M > 2.5$) сейсмических событий во времени и пространстве пока не выявлены: они, вероятно, связаны с общим изменением напряжений в пределах района добычи. Но уже ясно, что накопленная в массиве горных пород деформация реализуется в виде подвижек по существующим разломам [Heesakkers, Murphy, Lockner, Reches, 2004 и др.]. Судя же по результатам проведенных лабораторных экспериментов [Адушкин, Кочарян, Новиков, 2016; Кочарян, 2016], небольшое изменение материального состава зоны магистрального сместителя способно резко уменьшить скорость снижения фрикционного сопротивления в процессе сдвига разлома или трещины, вплоть до 10% от нормальной величины.

Снижение жесткости может быть зарегистрировано в виде увеличения амплитуд волн, отраженных от разломной зоны и, соответственно, в виде уменьшения амплитуды прошедших волн [Кочарян, 2016]. На базе такого подхода может быть организован дистанционный мониторинг потенциально опасных участков района горных работ: необходимо построить структурную модель массива, включающую сведения о местоположении крупных разломов и тектонических трещин; выбрать разломы, по которым с наибольшей вероятностью может произойти динамическая подвижка и организовать сейсмический контроль механических свойств выбранных зон [Адушкин, Кишкина, Кочарян, 2017]. Несомненно, степень изученности вмещающего массива должна постоянно повышаться путем оценки имеющихся и вновь поступающих данных о возможных смещениях бортов разломов или локализации источников слабой сейсмичности; должна постоянно модернизироваться конфигурация и чувствительность системы сейсмических и деформационных наблюдений.

Первые шаги в апробации предложенных подходов сделаны ИДГ РАН на шахте Комбината КМАруда (г. Губкин Белгородской области), разрабатывающей Коробковское месторождение железистых кварцитов в бассейне Курской магнитной аномалии. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-17-00095).

ЭНЕРГООБМЕН В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ РАЗРАБОТКЕ УДАРООПАСНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

А.А. Козырев, В.И. Панин, О.Г. Журавлева

Горный институт КНЦ РАН, Апатиты; kozar@goi.kolasc.net.ru, ZhuravlevaOG@goi.kolasc.net.ru

Каждая геологическая среда обладает определенным энергетическим потенциалом, уровень которого зависит от параметров напряженного состояния и свойств пород в массиве и который определяет все геомеханические трансформации в горнотехнической системе [Козырев, Панин, Савченко и др., 2002; Кропоткин, Поляк, 1973; Пономарев, 2008]. Основным источником этой энергонасыщенности являются латентные напряжения, появившиеся при генезисе пород, палео- и современные тектонические процессы совместно с техногенными нагрузками. Накопившаяся в геологической среде горнотехнических систем энергия определяет основные закономерности эво-

люции этих систем, наблюдаемыми проявлениями которой являются деформации пород в массиве и сейсмичность. При этом деформации характеризуют процессы концентрации энергии, а сейсмичность характеризует степень её релаксации, что в совокупности определяет некоторые стороны энергообмена.

Накопившаяся в геологической среде горнотехнических систем энергия определяет основные закономерности эволюции этих систем, наблюдаемыми проявлениями которой являются деформации пород в массиве и сейсмичность. При этом деформации характеризуют процессы концентрации энергии, а сейсмичность характеризует степень её релаксации, что в совокупности определяет некоторые стороны энергообмена. К настоящему времени по сейсмичности в горнотехнических системах Хибинского массива накоплено достаточно информации для анализа его энергонасыщенности и её динамики в процессе развития горных работ.

Ранее в Горном институте КНЦ РАН аналитическими исследованиями выполнен анализ энергонасыщенности геологической среды Кольского полуострова: построены карты энергонасыщенности с учетом основных тектонических структур, выделены аномально энергонасыщенные районы, удовлетворительно совпадающие с сейсмогенными зонами, в которых произошли крупные техногенные землетрясения. Дело в том, что Хибинский и Ловозерский массивы, являясь наиболее энергонасыщенными районами на территории Кольского полуострова, вмещают в себя мощные горнотехнические системы, в геомеханических пространствах которых всегда имеют место участки с высокими концентрациями напряжений и сильные триггеры в виде технологических взрывов. Энергетический класс наиболее сильных сейсмических событий при отработке месторождений Кольского полуострова $K = 11 \div 12$. Примеры таких техногенных землетрясений: рудники Кировский, 1989 г., «Умбозеро», 1999 г. Несмотря на оценку в целом сейсмического режима на территории Мурманской области как стабильно невысокого, геодинамический риск при разработке удароопасных Хибинских и Ловозерских месторождений за счет концентрации напряжений и их разрядки может существенно повлиять на безопасность горных работ, что и подтверждается соответствующей практикой. На основе анализа параметров напряженного состояния и сейсмичности в районе Хибинских горнотехнических систем показано, что основным способом снижения геодинамических рисков является управление геомеханическими процессами при ведении горных работ.

Таким образом, выполненный анализ показал, что энергонасыщенность геологической среды является важным фактором, определяющим геомеханическую ситуацию в горнотехнической системе и соответственно безопасность горных работ.

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА ПРОЯВЛЕНИЕ СЕЙСМИЧНОСТИ НА РУДНИКАХ ХИБИНСКОГО МАССИВА

А.А. Козырев, И.Э. Семенова, О.Г. Журавлева

Горный институт КНЦ РАН, Апатиты; kozar@goi.kolasc.net.ru, innas@goi.kolasc.net.ru, ZhuravlevaOG@goi.kolasc.net.ru

Хибинский горнорудный район является сложной системой, на которую воздействуют как специфические геологические условия, так и техногенные факторы в течение последние 80 лет. Совместная отработка семи сближенных месторождений в южной части Хибинского тектонически напряженного массива приводит к серьезным изменениям геодинамического режима и росту уровня сейсмической активности в пределах обрабатываемых месторождений. Сейсмичность массива горных пород зависит от исходного напряженно-деформированного состояния (НДС) и от трансформации геомеханических и геодинамических процессов, происходящих в нем. Каждое сейсмическое событие вносит свой вклад в изменение конфигурации поля напряжений, являясь следствием действия предыдущих сейсмических событий или следствием действия технологических взрывов.

Отработка Хибинских месторождений ведется в удароопасных условиях. Углубление горных работ и их интенсификация приводят к повышению фонового уровня напряжений и сейсмичности. Неизбежно также формирование зон концентрации напряжений и разгрузки отдельных участков массива в окрестности продвигающихся фронтов горных работ и элементов горной технологии. То есть поле напряжений становится более контрастным, что при наличии геодинамически активных структур приводит к повышению риска возникновения горных ударов регионального и локального масштаба. В связи с этим изучение влияния природных и техногенных факторов на проявление сейсмичности на рудниках Хибинского массива является актуальной задачей. Решение такой задачи возможно при применении комплекса методов. Комплексование сейсмических данных и результатов численного моделирования НДС массива позволяет более точно оценить геомеханическое состояние массива горных пород, установить причину возникновения динамических явлений, а также повысить качество оценки и прогноза потенциально удароопасных зон при планировании горных работ.

Пространственное распределение сейсмических событий связано не только с зонами активного ведения горных работ, но и с разрывными нарушениями в массиве, как имеющимся, так и формирующимся (например, в консоли пород висячего бока). Зачастую после проведения взрывных работ наблюдается спад сейсмоактивности.

Однако технологические взрывы могут быть и триггерами реализующихся после них сильных сейсмических событий. Поэтому при проектировании и ведении горных работ необходимо учитывать специфику отклика массива на сейсмическое воздействие, оказываемое взрывными работами. Комплексные исследования проведены для участков Кукисвумчоррского и Юкспорского месторождений Хибинского массива.

НАТУРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЙОНЕ ПОЛИГОНА ЗАКАЧКИ ЖИДКОСТИ НА САХАЛИНСКОМ ШЕЛЬФЕ

А.В. Коновалов, А.А. Степнов, А.В. Гаврилов, А.С. Сычев, К.А. Манайчев, В.А. Клачков, Е.С. Богданов
ООО «Геофизические технологии», Южно-Сахалинск; a.kononov@geophysystech.ru

Не вызывает сомнения естественная природа сейсмичности на сахалинском шельфе [Коновалов, Патрикеев, Сафонов и др., 2015]. Единственным возможным исключением является сейсмическая активизация в прибрежном районе острова, в нескольких км к юго-западу от полигона утилизации сточных вод. Точными данными по работе самой скважины авторы не располагают, однако известно, что ее ввод в эксплуатацию был запланирован в 2006 г., а максимальный темп закачки – в 2012 г. Первые микро-землетрясения, в исследуемом районе, были зарегистрированы локальной сетью сейсмического мониторинга [Степнов, Коновалов, Гаврилов, Манайчев, 2016] в июне 2012 г. Основная часть сейсмических событий приходится на октябрь-ноябрь 2013 г., наблюдаемая активизация имеет роевый характер. Магнитуда сильнейшего в этой группе события составила $M_L = 4.1$, глубина очага – 10.2 км. Решение тензора сейсмического момента указывает на чисто взбросовый характер подвижки. Средняя глубина гипоцентров составила около 10-12 км, что существенно больше глубины залегания пластов (около 2 км), на горизонте которых производится закачка жидкости. В период аналоговой эпохи инструментальных наблюдений на Сахалине в пределах рассматриваемой зоны (в радиусе 25 км от скважины) эпизодически регистрировалась коровая сейсмичность. Сильнейшее землетрясение произошло 24 августа 1988 г. Его магнитуда составила $M_L = 4.5$ и глубина очага – 9 км. Выполнено сопоставление графиков повторяемости фоновой сейсмичности за период с 1964 по 2006 гг. и активизировавшейся сейсмичности в 2013-2017 гг. Частота возникновения землетрясений возросла примерно в 2-3 раза. Отмечается также характерная форма графика повторяемости для роя землетрясений в 2013-2017 гг.

Сейсмическая активизация в 2012 г. в относительно асейсмичном районе вблизи полигона закачки жидкости выглядит необычной. По-видимому, гидравлическая передача порового давления через разломы и систему трещин в геосреде может объяснить трансфер напряжений на глубину сейсмогенного слоя 5-10 км [Goebel, Hosseini, Carra et al., 2016], где комбинация эффективных напряжений в породе близка к критическим значениям. Таким образом, закачка жидкости могла стать причиной активизировавшейся сейсмичности. Подобные примеры отмечены в различных районах нефтегазовых разработок (Оклахома, Колорадо, Арканзас и др.), в некоторых из них сейсмичность регистрировалась в 35 км от полигона закачки жидкости и на глубине до 10 км.

Моделирование, основанное на теории флюидонасыщенной пороупругой среды М. Био, показало [Zabolotin, Kononov, Stepnov et al., 2016], что скорость накопления касательных напряжений, вызванных закачкой жидкости, может быть сопоставима со скоростью накопления тектонических напряжений в случае, когда разломная зона симулируется относительно повышенным значением проницаемости. В этом случае сейсмичность может увеличиться в два раза уже на 5-ый год после начала закачки жидкости, что сопоставимо с полученными оценками по натурным данным. Каталоги землетрясений доступны на специализированном электронном ресурсе <https://eqalert.ru/ru>.

ВЛИЯНИЕ СЕЙСМИЧНОСТИ НА ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ (по данным наблюдений на скважинах и источниках Камчатки)

Г.Н. Копылова

Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая Геофизическая служба РАН», Петропавловск-

С 1977 г. проводятся наблюдения на сети скважин и источников в окрестностях г. Петропавловска-Камчатского (7 самоизливающихся скважин, три источника, две пьезометрические скважины). Цель работ – поиск гидрогеологических предвестников землетрясений. Результаты исследований представлены в публикациях автора и др., в которых приводится описание гидрогеосейсмических вариаций в изменениях физико-химических параметров подземных вод (уровней, дебитов, температуры, химического и газового состава) и даны положительные оценки возможности использования получаемых данных для среднесрочного прогноза сильных местных землетрясений

В работе рассматривается влияние землетрясений с M порядка 7 и более (интенсивность сотрясений $I_{\text{МСК-64}} \geq 5-6$ баллов) на водную разгрузку и вынос подземными водами тепла и растворенных минеральных веществ, а также другие аномальные эффекты, свидетельствующие об изменениях в состоянии водоносных систем, питающих источники и скважины, в процессе подготовки и реализации землетрясений. На примере Пиначевского источника показано, что воздействие сейсмических волн приводит к нарушению фоновых условий движения и разгрузки термоминеральных вод, и процессы тепломассопереноса в водоносной системе становятся резко нестационарными в течение длительного времени (месяцы–годы). Из общего количества поступившей на поверхность подземной воды 16% приходится на увеличение расхода источника в результате сильных землетрясений, для общего количества тепла эта величина составляет 14%, для различных минеральных компонентов – от 8 до 33% (хлор-ион – 33, натрий и калий – 28, бор – 8%).

Важным результатом многолетних наблюдений является обнаружение гидрогеологических предвестников в изменениях химического состава и уровня подземной воды в течение недель – первых месяцев перед сильными землетрясениями. В качестве гипотетических механизмов их образования рассматриваются вариации напряженно-деформированного состояния водоносных систем на стадии подготовки землетрясения, сопровождающиеся изменением порово-трещинной ёмкости водовмещающих пород и фильтрационных связей, а также фазовыми переходами в системе «вода – газ». Приводятся примеры сопоставления временных рядов данных по измерениям уровня, дебитов и химического состава подземных вод с изменениями параметров сейсмического режима и длин линий светодальномерных измерений. Показано, что на стадиях подготовки сильных землетрясений наблюдались аномальные вариации деформационных, сейсмических и гидрогеологических параметров в течение первых лет – месяцев: укорачивание длин измерительных линий, формирование сейсмических затиший в соответствии с изменением суммарного числа землетрясений и поведением параметра RTL , понижение уровня воды, уменьшение концентрации хлора в воде и др.

Выводы: 1. Воздействие землетрясений на подземные водоносные системы сопровождается интенсификацией процессов конвективного тепломассопереноса в верхних частях земной коры в зонах разгрузки подземных вод. 2. Подготовка ряда сильных камчатских землетрясений на расстояниях до первых сотен км сопровождалась синхронизацией сейсмических, деформационных и гидрогеологических процессов в форме различных видов предвестников. При этом гидрогеологические предвестники проявлялись на более поздних стадиях подготовки землетрясений, по сравнению с предвестниковыми эффектами в сейсмичности и в горизонтальных деформациях.

ОСОБЕННОСТИ ФЛЮИДОДИНАМИКИ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ (по данным равномерных наблюдений в скважинах Камчатки)

Г.Н. Копылова, С.В. Болдина, В.А. Касимова

Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая Геофизическая служба РАН», Петропавловск-Камчатский, boldina@emsd.ru

Воздействие сейсмических волн от сильных землетрясений сопровождается разнообразными вариациями уровней воды в пьезометрических скважинах – колебаниями, повышениями и понижениями различной интенсивности и продолжительности, отражающими специфические флюидодинамические процессы в системах «скважина – водовмещающая порода». Для характеристики воздействия сейсмических волн на состояние таких систем и объяснения разнообразия гидрогеосейсмических вариаций уровня воды в дальней зоне очага землетрясения (на расстояниях более одной длины очага) используется теоретическая оценка удельной плотности сейсмической энергии e , Дж/м³ [Wang, Manga, 2010]. В реальных условиях для количественной оценки сейсмического воздействия на наблюдательную скважину можно рассматривать частотный состав максимальных фаз движений грунта (скоростей, смещений и ускорений) по данным регистрации сейсмических сигналов широкополосной аппаратурой в районе скважины.

В скважине ЮЗ-5, вскрывающей в интервале 310–800 м скальные водовмещающие породы, проводится регистрация уровня воды с периодичностью 5 мин и разрешением ± 0.1 см. В докладе рассматриваются особенности вариаций уровня воды при прохождении сейсмических волн от 18-ти землетрясений ($M = 6.8-9.0$) на эпицентральных расстояниях 100–8500 км в зависимости от амплитудно-частотного состава сейсмических сигналов, зарегистрированных аппаратурой IRIS на сейсмостанции Петропавловск. В случае каждого землетрясения выделены гидрогеосейсмические вариации уровня воды и оценены их параметры – амплитуда, продолжительность, морфология (форма). Наблюдалось четыре типа сигналов в изменениях уровня воды: 1 – вынужденные и свободные колебания в течение часов; 2 – колебания с кратковременным (от минут – часов до первых суток) остаточным повышением; 3 – кратковременное остаточное повышение уровня воды; 4 – длительное (месяцы) понижение уровня воды.

С использованием широкополосных записей землетрясений выполнены оценки максимальных амплитуд движений грунта (скоростей, смещений и ускорений) и частотных диапазонов их проявления. Прослежены следующие

щие тенденции, определяющие особенности вариаций уровня воды в зависимости от амплитудно-частотного состава сейсмических волн: 1 – низкочастотные и низкоамплитудные сейсмические сигналы сопровождаются колебаниями уровня воды (при увеличении амплитуды сейсмического сигнала на колебательный режим могут накладываться кратковременные повышения уровня); 2 – относительно высокочастотные сейсмические сигналы сопровождаются повышением уровня воды (при увеличении амплитуды сигнала в случаях наиболее сильных землетрясений проявляются длительные (месяцы) понижения уровня).

С использованием моделирования показано, что колебания уровня воды возникают вследствие резонансного эффекта усиления флюидного давления в системе скважина – водовмещающая порода при прохождении поверхностных сейсмических волн с периодами, равными или превышающими резонансную частоту скважины (44 с) [Корюлова, Boldina, 2007]. Предполагается, что повышение уровня в течение десятков минут-часов после прохождения сейсмических волн вызывается кратковременным ростом флюидного давления вследствие локального изменения проницаемости водовмещающих пород и нарушения стационарных условий течения воды в области непосредственно примыкающей к стволу скважины [Кочарян, Виноградов, Горбунова и др., 2011]. Длительное понижение уровня в результате ощутимых землетрясений ($I_{\text{msk-64}} \geq 5$ баллов) может быть связано с существенными изменениями структуры водоносной системы в радиусе порядка сотен метров от скважины и увеличением проницаемости водовмещающих пород, которое сопровождалось падением флюидного давления с амплитудами до 0.03–0.1 бар.

О ФЛУКТУАЦИЯХ НАПРЯЖЕНИЙ В ГЕОМАТЕРИАЛАХ В ПРОЦЕССЕ ДЛИТЕЛЬНЫХ СЛАБЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

В.П. Косых, П.В. Косых

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Новосибирск; v-kosykh@yandex.ru

Природа знакопеременной реакции горного массива на внешние воздействия связана с множественностью форм равновесия геосреды. Одним и тем же краевым условием может соответствовать неограниченное число форм ее равновесного состояния [Курленя, Опарин, Ревуженко и др., 1993]. Кратковременные сильные воздействия на массив способны приводить к перестройке его структуры и аккумуляции части энергии в виде самоуравновешенных внутренних напряжений.

В настоящей работе показано, что аналогичные последствия в массиве раздробленного материала могут вызывать также слабые динамические возмущения, действующие длительное время. Сыпучий материал (кварцевый и речной песок, мраморная крошка) помещался в прямоугольную емкость 250×150×200 мм с жесткими стенками. В одной из торцевых стенок емкости было выполнено отверстие диаметром 20 мм, заклеенное листовой резиной, толщиной 1.5 мм. При заполнении емкости в материале размещались датчики для измерения вертикального давления. Эксперимент заключался в непрерывном и длительном нанесении через резину слабых ударов с частотой 1.5 Гц. Энергия одного удара от эксперимента к эксперименту менялась от 10^{-4} до $5 \cdot 10^{-3}$ Дж, число ударов – от 10^5 до 10^7 . Установлено, что с увеличением числа ударов вертикальное давление в сыпучем материале колеблется относительно γH – веса столба материала над датчиком. Оказалось, что размах этих колебаний может достигать 150% - от 0.3 до 1.7 γH . С удалением от источника возмущений размах изменения давления увеличивается. Анализ экспериментально полученных графиков указывает на фрактальную структуру процесса. В зависимости от условий проведения эксперимента процесс изменения напряжений может протекать по разным сценариям, включая периодические режимы и режимы со спектром мощности, характерным для черного шума [Kazantsev, Kosykh, Revuzhenko, 2015].

Причиной описанного поведения сыпучего материала является непрерывная перестройка упаковки образцов, образование и разрушение кластеров (зон уплотнения и разрушения). Кластеризация сопровождается перестройкой силовых цепочек и, как следствие, локальным изменением давления. *Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-10121).*

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РЕЖИМОВ СКОЛЬЖЕНИЯ РАЗЛОМОВ

Г.Г. Кочарян

Институт динамики геосфер РАН, Москва; gevorgkidg@mail.ru

Представления о различных типах скольжения разломов часто связываются с концепцией существования прочных (asperity) и слабых участков. Нам более подходящим представляется предположение о наличии участков отличающимися фрикционными свойствами. При этом разные фрикционные свойства заключаются в различии не

столько коэффициента трения, сколько закономерностей переходного процесса от трения покоя к трению скольжения. Именно как участки с разной скоростью снижения сопротивления сдвигу в процессе скольжения следует, по нашему мнению, понимать «жесткие» и «мягкие» включения. Изменения вещественного состава геоматериала в зоне скольжения разлома, порового давления, литостатических напряжений, температуры приводят к тому, что участки крупных разломов обладают разной жесткостью и на них реализуются различные режимы скольжения. Кроме того, деформации, происходящие на одном из сегментов гетерогенной разломной зоны, неизбежно сказываются на режиме скольжения соседних участков, а иногда и разлома в целом.

Выполненные в данной работе расчеты показывают, что энергия землетрясений напрямую зависит от плотности расположения жестких зон. Старт «сейсмогенного разрыва» всегда происходит на этих участках, хотя динамическому срыву может предшествовать событие медленного скольжения на соседнем участке разлома, обладающем соответствующими фрикционными свойствами. Длительное постдинамическое деформирование участков медленного скольжения в свою очередь может инициировать скорый повторный динамический срыв «жесткого» блока. Такие «дуплеты» с различным временем задержки иногда наблюдаются и в природе (Симуширские землетрясения 2006-2007гг., землетрясения Izmit и Düzce 1999 г. на Северо-Анатолийском разломе и др.). Хотя «медленные» участки способны поддерживать распространение разрыва, они в значительной степени демпфируют распространяющийся по разлому импульс от срыва “asperity”, инициирующий подвижку стабильных участков, то есть играют важную роль в процессе остановки разрыва.

Взаимное расположение и плотность участков разлома с разными фрикционными характеристиками определяет весь ход развития сейсмогенного разрыва – от зарождения до остановки, то есть землетрясение заранее может «знать» свою магнитуду. *Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-05-00694).*

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ИНФРАЗВУКОВЫЕ ПОЛЯ, ГЕНЕРИРУЕМЫЕ ПОЛЯРНЫМИ СИЯНИЯМИ

А.В. Крашенинников, Ю.С. Рыбнов, С.П. Соловьев

Институт динамики геосфер РАН, Москва

Геофизические процессы, связанные с магнитосферными возмущениями, сопровождаются возникновением акустико-гравитационных волн (АГВ) и возмущений электрического поля. Накопленный опыт геофизического мониторинга за инфразвуковыми и электрическими полями в приземном слое атмосферы от различных природных и техногенных источников показывает определенную взаимосвязь этих явлений [Соловьев, 2017]. В настоящее время установлено влияние магнитосферных суббурь на вариации атмосферного электрического поля, наиболее ярко проявляющийся в авроральных и полярных широтах [Клейменова, 2012]. В средних широтах этот эффект проявляется при достаточно мощных магнитосферных суббурях.

Исследования по генерации инфразвука при магнитных суббурях интенсивно проводились в 60-80-х годах 20 века [Chimonas, 1970; Wilson, 1975]. В ряде работ исследовался механизм генерации АГВ в атмосфере, обусловленных колебаниями давления в ионосфере при повышенной геомагнитной активности. Одним из возможных механизмов генерации, наблюдаемых волновых процессов во время суббурь, могут быть акустические волны в нейтральной атмосфере, которые возбуждаются при движении дуг полярных сияний со сверхзвуковыми скоростями. Анализ экспериментальных данных показал, что период АГВ, вызванных магнитными суббурями, лежит в диапазоне от 1 до 4 минут.

Целью данной работы является экспериментальное исследование совместного проявления инфразвуковых колебаний давления и вариаций приземного электрического поля в средних широтах при мощных геомагнитных возмущениях. Проведение таких измерений позволит исследовать процессы взаимодействия данных геофизических возмущений в приземном слое атмосферы с возмущениями в ионосфере.

ЭНДОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ КАК ТРИГГЕР КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ОПОЛЗНЯ 03.06.2007 г. В ДОЛИНЕ ГЕЙЗЕРОВ (КАМЧАТКА)

Ю.А. Кугаенко

Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук»,

Камчатской Долиной Гейзеров называют среднюю часть долины реки Гейзерной, где сосредоточены редкие периодически извергающиеся кипящие источники – гейзеры. Долина реки Гейзерной, имеющая характер каньона глубиной от 120-150 м в верховьях и до 300-350 м в средней части, заложена по зоне кольцевого разлома, ограничивающего с востока Узон-Гейзерную вулканотектоническую депрессию. На этом участке депрессия соседствует с

действующим вулканом Кихпиньч. Геологическая позиция пород, примыкающих к крутому борту депрессии, является одной из причин, определяющих высокую активность процессов склоновой неустойчивости Долины Гейзеров. Но в районах высокой сейсмической и геодинамической активности (в частности, на Камчатке) при оценке риска возникновения оползней и обвалов значительно возрастает удельный вес комплекса геодинамических факторов. В докладе обсуждаются результаты независимых геолого-геофизических исследований (SAR-интерферометрия, термогидродинамические наблюдения, тепловая и инфракрасная съемка, временные сейсмологические наблюдения), свидетельствующие об активизации эндогенных процессов исследуемого района. После оползня 03.06.2007 г. район исследовался, в частности, методом низкочастотного микросейсмического зондирования (ММЗ) [Горбатиков, Степанова, Кораблев, 2008]. Сопоставление геометрии глубинных структур, обнаруженных ММЗ, с локальной слабой сейсмичностью и моделью внедрения магмы в верхние горизонты коры позволило уточнить возможное положение магматического внедрения, зафиксированного InSAR [Леонов, 2014]. Также были выявлены области возможной концентрации базальтовых расплавов (периферический магматический очаг вулканического массива Кихпиньч и более глубокая магматическая камера) [Кирюхин, Рычкова, 2011], которые могут являться источником наблюдавшейся локальной геодинамической активизации. Выдвинуто предположение, что именно эндогенные процессы (эпизод скрытого магматического внедрения, деформация земной поверхности, изменение термодинамических параметров и конфигурации Гейзерной высокотемпературной гидротермальной системы, слабая локальная сейсмичность) являются триггером оползня 2007 г. Активизация процессов склоновой неустойчивости в Долине Гейзеров продолжилась крупным обвалом борта депрессии 3-4.01.2014 г. [Кугаенко, Салтыков, Горбатиков, Степанова, 2015].

УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В СИСТЕМЕ: ЛИТОСФЕРА, АТМОСФЕРА, ИОНОСФЕРА

В.В. Кузнецов

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ИКИР, ДВО РАН, Камчатка, Паратунка;
vvkuz38@mail.ru, ikir@academ.org

Ударная волна (УВ) - это распространяющийся по среде фронт резкого, почти мгновенного, изменения параметров среды: плотности, давления, температуры, скорости. УВ называют также сильными разрывами или скачками. Причины возникновения УВ в газах – полеты со сверхзвуковыми скоростями (звуковой удар), истечения с большими скоростями через сопла, мощные взрывы, электрические разряды, интенсивное горение. УВ в сплошной среде - возникает при реализации очень быстрого фазового перехода, например, ударной кристаллизации переохлажденной жидкости, или ударной конденсации пересыщенного пара и т.п.

Принято считать, что землетрясение – это тектоническое смещение или разрыв в земной коре или верхней части мантии Земли. Принципиально новый подход к физике землетрясения предложен автором в 1990 г после знакомства с результатами разрушений, произошедших во время Спитакского землетрясения 1988 г. Ударно-волновая модель землетрясения базируется на опыте, полученном им при исследованиях явлений, происходящих с твердой средой под воздействием на неё кумулятивных струй, взрывов и высокоскоростных ударов. Автор показал, что выход УВ на поверхность упругой среды с высокой достоверностью соответствует характеру так называемых «сильных движений» в эпицентре землетрясения. Как было показано в дальнейших исследованиях, УВ является принципиально новым и важным элементом в модели вулкана, алмазных трубок взрыва, взрывных выбросах углеводородов в породах вечной мерзлоты, горных ударах и пр. Возникновение УВ в ионосфере так же (по нашей модели) оказывается связанным с УВ в литосфере - за счет проявления литосферой и атмосферой квантовых свойств – многочастичной квантовой сцепленности на протонах водородных связей.

Ударно-волновая модель землетрясения: рассмотрены вопросы возникновения УВ. Два подхода: акустический и квантовый. Природа афтершоков - как квантовых явлений. Обсуждается физика сильных движений при выходе УВ на поверхность Земли.

Распространение УВ в литосфере: затухание УВ на вязкой неоднородности (расплаве) и формирование вулканического очага. Формирование алмазных трубок как следствие прохождения УВ, ударно-волновая модель взрывной воронки и других источников взрывных выбросов метана, горный удар как причина выброса метана в угольной шахте.

Ударная волна в ионосфере в момент землетрясения: волны в атмосфере и ионосфере от сейсмодвижителя. Формирование акустической ударной волны (АУВ) в переохлажденном облаке как афтершок основного землетрясения (литосферной УВ). Лабораторное моделирование АУВ. Волна разрежения, выброс льдины из облака и образование дыр в облаке. (Гром среди ясного неба). Распространение АУВ из атмосферы до ионосферы и формирование УВ в ионосфере, регистрируемой по регистрации полного содержания электронов в ионосфере.

КВЕЙК – КАК ВОЗМОЖНЫЙ КВАНТОВЫЙ МЕХАНИЗМ ТРИГГЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ

В.В. Кузнецов¹, И.В. Кузнецов²

¹ - Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ИКИР, ДВО РАН, Камчатка, Паратунка; vvkuz38@mail.ru ikir@academ.org

² - Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск; kuznetsov_i@hydro.nsc.ru

Квейки (quakes) - трясение среды на фоне изначально спокойного её состояния. Где и как происходят квейки? В монографии [Csermely, Links, 2009] подобные явления относятся к таким явлениям, кроме хорошо известного всем явления earthquake, как: ice quake; wood quake; protein quake и т.п. Автор монографии полагает, что в подобных случаях имеет место нарушение флуктуационно-диссипационной теоремы.

В настоящем докладе рассмотрены макроскопические импульсные процессы, которые можно моделировать и на квантовом уровне. Обычно считается, что квантовые процессы происходят на очень малых временах и масштабах. Авторы считают, что вторым постулатом можно пренебречь, если отказаться от однозначных моделей в квантовой механике. (Отметим что, многозначные быстрые квантовые процессы можно рассматривать и при высоких температурах). Современная интерпретация квантовой механики, зиждущаяся на измерениях и вероятностных амплитудах, содержит исключительно корректные задачи (well-posed problems). Очевидно, что в многочастичном случае неповторяющиеся и непредсказуемые явления приводят именно к неоднозначным моделям в квантовой механике.

В докладе рассмотрены следующие аспекты: 1. В многочастичном случае понятие квантовой системы является неоднозначным понятием. То есть, если моделировать квейк (быстрые макроскопические флуктуации), то никогда нельзя определить однозначно даже количество частиц N в соответствующей квантовой системе; расположения квантовых подсистем $S_i, i = 1, \dots, N$; степени свободы каждой подсистемы S_i ; расположения подокружений E_i и т.д. 2. Здесь мы для простоты будем рассматривать случай, когда квантовая подсистема S_i взаимодействует только со своим ближайшим подокружением E_i . (Здесь предполагаются взаимодействия, описываемые однозначными Гамильтонианами). Авторы доклада считают, что «квантовая сцепленность» подокружений приводит к общему окружению, предполагая, что все E_i не взаимодействуют друг с другом. Но и здесь возникает неоднозначность, поскольку заранее неизвестно, какие K штук из подокружений E_i образуют общее окружение (common environment) $\diamond_{j=1}^K E_{k_j}$ где $K \leq N$. Здесь \diamond есть знак композиции, который был введен, например, в [Döring, Isham, 2008]. (Здесь мы не используем знаки \cup и \cap , которые обычно применяются при описании объединений несцепленных подсистем и окружений). Таким образом, коллективная декогеренция композиции подсистем $\diamond_{j=1}^K S_{k_j}$ является неоднозначным процессом. Более того, многочастичные квантовые состояния соответствующих подсистем могут выживать, могут переходить в другие квантовые состояния. 3. Из первых двух пунктов вытекает, что квантовые Гамильтонианы, описывающие динамику открытых многочастичных квантовых систем $\diamond_{i=1}^N S_i$ (композиции подсистем $\diamond_{j=1}^K S_{k_j}$ являются многозначными. Здесь между общим окружением $\diamond_{j=1}^K E_{k_j}$ и соответствующей композицией квантовых подсистем $\diamond_{j=1}^K S_{k_j}$ можно учитывать фиктивные (многозначные) взаимодействия, которые имеют отношение к «сцепленности» между подсистемой и окружением.

Макроскопические импульсные процессы приводят к тому, что классические законы сохранения приобретают импульсную форму:

$$\partial_t U(x,t) = AU(x,t), t \neq t_k \quad U(x,t_k+0) = U(x,t_k-0) + B_k(x),$$

где U – вектор классических параметров (плотность, давление, и т.д.), x – пространственная переменная, t – временная переменная, в каждый k -ый момент времени t_k происходит k -ый квейк, $0 < t_1 < \dots < t_k < \dots$, $U(x,t_k+0)$ и $U(x,t_k-0)$ – односторонние пределы, A – эволюционный оператор. Поскольку каждому k -му импульсу соответствует свой многочастичный и многозначный квантовый процесс, то соответствующая «квантовая сцепленность» приводит к тому, что носитель функции $B_k(x)$ является несвязным множеством. Таким образом, каждый k -ый импульс можно представить как семейство одновременных импульсов. Отметим, что вышеупомянутое «нелокальное» свойство импульсов пока не имеет должного рассмотрения в научной литературе.

При моделировании макроскопических импульсных процессов (квейков), мы можем использовать уже известные квантовые процессы, происходящие на «микроуровне», за счет предположения, что K из N квантовых процессов происходят коллективно. Как было отмечено ранее, такое описание не является однозначным.

Приведем два основных примера квейков: 1. До сих пор неизвестно «нелокальное» свойство коллективной кристаллизации (spontaneous freezing) переохлажденной воды. Мы предполагаем, что это явление является причиной многих триггерных явлений в атмосфере. 2. Мы предполагаем, что структурные фазовые переходы в минералах, содержащих водородные связи, служат триггерами многих сейсмических явлений. 3. Из первых двух примеров следует, что таким образом мы получаем известную из наблюдений взаимосвязь между процессами в литосфере и в атмосфере (ионосфере).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ РАЗГРУЗКИ САМОНАПРЯЖЕННЫХ ОБРАЗЦОВ ГЕОМАТЕРИАЛОВ

С.В. Лавриков, О.А. Микенина, А.Ф. Ревуженко

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Новосибирск; lvk64@mail.ru, olgarev@yandex.ru, revuzhenko@yandex.ru

Разработан подход к численному моделированию процесса деформирования самонапряженных образцов горных пород на основе методов конечных и дискретных элементов. Строится плоская упругопластическая модель среды, обладающей внутренней структурой. В качестве структурных элементов рассматриваются зерна и среда, заполняющая межзеренное пространство. Показано, что учет упругих свойств структурных элементов наряду с учетом пластических сдвигов на контактах между зернами, позволяет описать свойство горной породы запасать и высвободить упругую энергию, запасенную в виде внутренних самоуравновешенных напряжений. На основе разработанной модели с использованием метода конечных элементов проведено численное моделирование сжатия самонапряженных образцов горной породы. Показано, что внутренние самоуравновешенные напряжения в зависимости от их распределения могут как увеличить, так и снизить предельную нагрузку, при которой происходит разрушение образца. Для исследования пространственных задач развит подход в рамках метода дискретных элементов. Между частицами вводятся связывающие их упругие элементы. Перевязанные упругими элементами частицы за счет трения могут самозаклиниться. Среда, набранная из таких связанных частиц, в силу их взаимного расположения и учета трения обладает свойством аккумулирования потенциальной энергии упругого деформирования.

Проведено численное моделирование сжатия модельного образца. Показано, что диаграмма деформирования включает в себя ряд ниспадающих участков – динамических срывов. Сжатие образца геоматериала приводит к аккумулированию части энергии в виде внутренних самоуравновешенных напряжений. Оценки показывают, что образец способен запасать до 30% энергии, затраченной на его деформирование. Незначительное внешнее воздействие может сыграть роль триггера и привести к динамическому высвобождению накопленной энергии. *Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-10121).*

О ПЕРИОДИЧНОСТЯХ В СЕЙСМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ И ИХ СВЯЗИ С КОСМОГЕННЫМИ ФАКТОРАМИ

Е.А. Левина

Институт земной коры СО РАН, Иркутск; levina@crust.irk.ru

В последние годы активно изучается вопрос о возможной связи между сейсмичностью Земли и различными космическими циклами [Викулин, Быков, Лунева, 2000; Левин, 2006; Тяпкин, 2012; Levina, Ruzhich, 2015; Sidorenkov, 2009]. Периодичность в сейсмическом режиме отмечена многими исследователями и выделено множество гармоник, в том числе 0,5; 1,0; 5-6; 10-11; 40-44 лет [Любушин, Писаренко, Ружич, Буддо, 1998; Ружич, 1997; Шестопалов, Харин, 2004]. В работе для целей среднесрочного прогноза землетрясений на примере Байкальской рифтовой зоны подтверждено наличие статистической связи между несколькими космическими циклами и уровнем сейсмической активности. Использован метод накопления: для выяснения статистической связи двух процессов соответствующие ряды сначала сглаживаются с помощью одинакового временного окна, затем вычисляется, на какие фазы или амплитуды одного процесса приходятся максимальные значения параметров другого процесса, просуммированные по длительному промежутку времени. С применением этого метода были рассмотрены 27-суточный цикл обращения Земли вокруг барицентра системы Земля-Луна, годичный цикл обращения Земли вокруг Солнца, 11-летний цикл солнечной активности и 18-летний цикл обращения узлов лунной орбиты. Уровень сейсмической активности представлен в виде рядов количества землетрясений и суммарной выделенной сейсмической энергии. Для всех рассмотренных циклов выявлены периоды (по фазам или диапазонам амплитуд), на которые приходятся максимумы количества землетрясений и/или выделенной сейсмической энергии, причем эти закономерности четко проявляются для количества землетрясений.

Опираясь на полученные результаты, можно сделать вывод: не смотря на то, что сейсмотектонические явления в твердой литосферной оболочке Земли вызываются процессами, происходящими в ее недрах, постоянно действующие космические факторы способны через триггерные эффекты модулировать диссипацию сейсмической энергии. На практике детальное изучение проявлений подобной модуляции важно для использования в среднесрочном прогнозе землетрясений.

ОБЛАСТИ ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНОЙ КОНВЕРГЕНЦИИ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТО-ПОТОКОВ

М.Г. Леонов¹, Р.Г. Гарецкий²

¹

Изучение взаимодействия литосферных плит (плито-потоков) – одна из приоритетных задач геодинамики. Областям конвергенции литосферных плит, как правило, соответствуют протяженные линейные зоны концентрированной деформации (сутуры), которые маркируют контакт двух литосферных сегментов. В настоящее время выявлены области схождения *трех и более* литосферных сегментов, которым соответствуют своеобразные тектоно-геодинамические узлы (области встречной «центростремительной» субдукции).

Слободский тектоно-геодинамический узел (СУ). Расположен в центральной части ВЕП, в районе Слободской возвышенности (55° с.ш., 31° в.д.). Здесь происходит сочленение трех сегментов земной коры: Фенноскандинавского, Волго-Уральского и Сарматского сегментов, разделенных сутурами. СУ характеризуют: радиальное схождение сегментов фундамента и шовных зон; кольцевое расположение разломов, формирующих трубообразную или воронкообразную структуру; аномальное строение магнитного и гравитационного полей с элементами вихревого закручивания аномалий; локализованная по глубине сложная плотностная структура подкорковых масс; 3D сдвиговое течение пород фундамента и чехла в виде квазипластичных плито-потоков; морфология поверхности фундамента и рельефа; признаки ротационного режима, присущие как структуре узла, так и ВЕП в целом [Гарецкий, Каратаев, 2014; Паталаха, Лукиенко, Гончар, 1995]; современная геодинамическая активность района [Адушкин, Спивак, 2005]. Эта структура названа «структура омыта» (pool-structure) [Гарецкий, Каратаев, 2014].

Памирско-Гималайский тектоно-геодинамический узел. Анализ геолого-геофизических данных позволил выявить следующие особенности строения и развития региона: Памир – структурно обособленное композитное геологическое тело, аллохтонно залегающее на подстилающем фундаменте Таримского и Афгано-Таджикского континентов; Памир принадлежит к категории горизонтальных протрузий (плито-потоков), которые относительно автономны по отношению к соседствующим сегментам земной коры; формирование структуры региона связано с деламинацией (расслоением) корового слоя: тектоническим срывом средней-верхней коры и ее «наползанием» на древние массивы и погружением нижней коры и литосферной мантии; Памир располагается над точкой сочленения различных фрагментов Центрально-Азиатского и Альпийско-Гималайского пояса, а область взаимодействия литосферно-мантийных потоков проецируется в район Центрального или Южного Памира и Гиндукуша; массы Памира дискордантно перекрывают зону стыка литосфер Азии и Индии; в районе Памира происходит сопряжение индийской и азиатской литосфер, которые контактируют по сейсмофокальным зонам (зонам внутриконтинентальной субдукции). Направленные навстречу друг другу плито-потоки в зоне схождения образуют воронку с углами наклона 45–50°, становясь в погружении практически вертикальными.

Антильско-Карибский геодинамический узел. Находится на стыке четырех литосферных сегментов: Северо- и Южно-Американского (континентальных) и Тихоокеанского и Атлантического (океанических), между которыми зажат Антильско-Карибский сегмент (АКС) с переходным типом коры. Первые два сегмента пододвигаются под АКС, тогда как вторые надвигаются на Карибский глубоководный бассейн. Образуется сложный структурно-кинематический узел, отражающий процесс сдвижения разнонаправленных встречных литосферных и подлитосферных плито-потоков. Таким образом, можно говорить о существовании *особого типа тектоно-геодинамических ансамблей*, являющихся отражением обстановки встречного центростремительного движения (объемного течения) нескольких разнородных литосферных сегментов.

ИНТРАБАСЕЙНОВЫЕ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЕ МОРФОСТРУКТУРЫ ПО ДАННЫМ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

М.Г. Леонов¹, Ю.А. Морозов², Ю.П. Стефанов³, Р.А. Бакеев³

¹ - ФГБУН Геологический институт РАН, Москва; mgleonov@yandex.ru

² - ИФЗ РАН, Москва

³ - Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Новосибирск

Характерной чертой морфотектоники консолидированной (континентальной) земной коры является наличие отрицательных структур (депрессий, синеклиз, впадин, бассейнов), которые испытывают перманентную тенденцию к опусканию. При всем многообразии динамических бассейнов наблюдается одна общая тенденция их структурной эволюции, а именно, «внезапное» дискретное расчленение дна бассейнов на систему относительно узких положительных морфоструктур (вздутый, складок, горстов) и широких прогибов. Подобный сценарий зафиксирован в разных тектонических обстановках на Тянь-Шане, в Африке и Северной Америке, на Балтийском щите и в Забайкалье. Тектоническая «судьба» возникших морфоструктур различна. Обычно на месте прогибов возникают широкие отрицательные морфоструктуры (мегасинклинали) с относительно слабой деформацией от-

ложений, на месте поднятий формируются узкие линейные шовные зоны с интенсивной внутренней деформацией пород, известные как зоны концентрированной деформации, структуры «цветка» или «пальмового дерева». Эти структуры могут следовать генеральному структурному тренду бассейнов, но могут быть по отношению к нему и резко дискордантны.

Природа и механизмы структурной дифференциации динамических бассейнов обсуждались в геологической литературе, но истолкования, полностью адекватного природным реалиям, проблема не получила. Изучение геологических объектов и анализ литературных данных позволил установить, что: дифференциация бассейнов происходит внезапно и приурочена к определенному этапу их развития; начало дифференциации связано некой зависимостью с мощностью накопившихся в нем отложений; формирование дискретной структуры дна бассейнов может осуществляться по трем сценариям: в условиях транспрессии (сдвиг и поперечное укорочение бассейна), транстенсии (сдвиг и поперечное удлинение бассейна), сдвига по отдельным плоскостям внутри бассейна без изменения его внешней формы.

Для уточнения и обоснования этих положений нами было проведено геологическое изучение геодинамической системы Нарынская впадина – хребет Байбичетоо – Атбашинская впадина (Срединный Тянь-Шань), которое сопровождалось тектоно-физическим и численным моделированием. *Тектоно-физические* исследования подтвердили необходимость сдвиговой составляющей как в момент возникновения зарождения внутрибассейновой зоны поднятия, так и в процессе ее дальнейшей структурной эволюции, а также позволили выявить дискретность и стадийность ее формирования со сменой тектонического режима (транстенсия – на ранних стадиях, транспрессия – на поздних), что хорошо согласуется с данными полевой геологии. *Численное моделирование* выявило новые закономерности развития морфоструктуры осадочных бассейнов. Увеличение глубины осадочных бассейнов связано с последовательностью приложения нагрузки, то есть с процессом накопления осадочных отложений. Предполагается, что структурообразующие процессы среднего слоя земной коры (фундамента), связанные с перераспределением в нем напряжений и деформаций, влияют на изменение формы дневной поверхности и, по-видимому, поверхности фундамента. Показано, что увеличение толщины деформируемого слоя (накопление осадков) приводит к изменению значений сдвига основания. Возникновение магистрального разлома на глубине 4,5 км происходит при сдвиге основания порядка 25-30 м; на глубине 10 км – при сдвиге основания 120 м. Форма и ориентация поверхностных нарушений меняется по мере роста сдвига основания с прямолинейной на S-образную.

Полученные данные в совокупности позволяют уточнить природу дискретной дифференциации как внутригорных впадин Тянь-Шаня, так и динамических осадочных бассейнов в целом. *Работа выполнена по теме госзадания № 0135-2016-0012 и при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-05-00357).*

ВОПРОС ДАЛЬНОДЕЙСТВИЯ АНОМАЛИИ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ В СРЕДЕ, НАХОДЯЩЕЙСЯ В ЗАКРИТИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ

А.С. Лермонтова, Ю.Л. Ребецкий

ИФЗ РАН, Москва; alermontova@mail.ru

В работе рассматривается проблема оценки расстояний, на которых в горных массивах ощущается деформационное влияние областей готовящихся землетрясений. С её решением связан ответ на вопрос, на какой территории следует ожидать афтершоков произошедшего землетрясения.

Считается, что область подготовки землетрясения – это объём пород, содержащий очаг землетрясения, и имеющий аномальный уровень напряжений относительно фонового напряженного состояния его окружения. В зависимости от того, выше [Reid, 1910] или ниже [Рихтер, 1963] аномальные напряжения относительно фоновых, область подготовки землетрясения можно рассматривать как жесткое или как мягкое включение. Существуют оценки зоны влияния области подготовки очага землетрясения, основанные на решении задачи теории упругости. Так, в работе [Добровольский, 1991] предложена формула, позволяющая на основе решения задачи теории упругости оценить дальность влияния области очага землетрясения в зависимости от его магнитуды. Однако многие исследователи отмечают, что в природе влияние землетрясений ощущается на значительно больших расстояниях. Как мы предполагаем, противоречие здесь в том, что геологическая среда находится в закритическом (то есть подобном пластическому) состоянии еще на стадии, предшествующей формированию очага. Применительно к породам верхней и средней коры речь идет не о пределе упругости и появлении истинных пластических деформаций (дислокации в зернах и кристаллах) [Николаевский, 1996], а о трещинных деформациях, связанных с превышением предела катакластической текучести [Ребецкий, 2007]. Очевидно, что распределение напряжений в окрестности включения, создающего аномалию напряженного состояния в случае, если среда находится в упругопластическом состоянии, существенно отличается от распределения напряжений в аналогичной ситуации, но в чисто упругой среде.

Разницу между этими двумя состояниями удобно проиллюстрировать на примере решения двумерной задачи для полосы с цилиндрическим включением, на стенках которого задаётся фиксированное давление. Искомым является закон изменения напряжений за пределами цилиндра. Если рассматривать эту задачу, считая, что среда является идеально упругой, получим, что закон изменения напряжений при удалении от цилиндра обратно пропорционален квадрату расстояния от его центра.

Теперь предположим, что среда упругопластическая, причём в начальном состоянии она уже находится за пределом текучести. В этом случае, в зависимости от уровня давления, создаваемого во включении, может изменяться соотношение не только между радиальным и тангенциальным напряжением, но и между этими напряжениями и вертикальным напряжением σ_{zz} . Расчёты при возможных вариантах соотношений между главными напряжениями показывают, что в упругопластической среде аномальные напряжения могут стремиться к фоновым как быстрее, так и значительно медленнее, чем в упругой среде, в зависимости от типа геодинамического состояния. При этом ситуация более медленного затухания изменения напряжений может встречаться как при жёстком, так и при мягком включении.

Таким образом, можно сделать вывод, что в горных массивах довольно часто может складываться такая геодинамическая обстановка, что произошедшее землетрясение меняет напряжённое состояние в гораздо большей своей окрестности, чем показывает решение задачи теории упругости, и, следовательно, может инициировать афтершоки на гораздо большей территории.

РОЛЬ БЛОКОВОЙ СТРУКТУРЫ ЭПИЦЕНТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ЧУЙСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В ФОРМИРОВАНИИ СТРУКТУРЫ АФТЕРШОКОВ

Е.В. Лескова^{1,2}, А.А. Еманов^{1,2}, А.Ф. Еманов^{1,3}, А.В. Фатеев^{1,2}

¹ - Алтае-Саянский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Новосибирск; katty@g.sbras.ru

² - Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск

³ - Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

Развитие сети сейсмологических станций Алтайского сейсмологического полигона началось с 2002 г., когда в Чуйско-Курайской зоне Горного Алтая число стационарных станций было увеличено на порядок и началось проведение в летний период экспериментов с временными сетями станций [Еманов, Колесников, Еманов и др., 2003]. Чуйское землетрясение 2003 г. магнитудой $M_s = 7.3$ с эпицентром в центре локальной сети проявилось в сейсмически активизированной блочной структуре, закономерности развития сейсмического процесса в которой проявляются существенно быстрее, чем в периоды протекания фоновой сейсмичности. Дальнейшее развитие сети станций полигона и многочисленные эксперименты с сетями временных станций [Еманов, Еманов, Лескова, Фатеев, 2016] дали уникальные возможности по анализу взаимосвязи строения эпицентральной зоны с закономерностями развития афтершокового процесса. Один из этапов анализа данных представлен в работе [Еманов, Лескова, Еманов, Фатеев, 2009].

В данном исследовании существенно расширен объём экспериментальных данных, участвующих в анализе, применены алгоритмы обработки, повышающие точность определения координат, и рассматриваются пространственно-временные изменения сейсмического процесса.

Одним из преимуществ геологического строения Алтайского сейсмологического полигона является наличие контрастных структур небольших размеров, что позволяет сравнительно небольшой локальной сетью станций детально исследовать сейсмический процесс в активизированной блочной структуре. Линейная сдвиговая подвижка главного толчка Чуйского землетрясения проходит через геологические блоки: Чуйская впадина, Чаган-Узунский блок и Курайская впадина. Именно этими блоками определяются элементы афтершокового процесса первого уровня. Структура афтершоков второго уровня определяется тектоническим строением горных хребтов, примыкающих с запада к впадинам и секущих тектоническими нарушениями линейную афтершоковую область [Еманов, Лескова, Еманов, Фатеев, 2009].

В исследованиях установлено, что: 1. Процесс неравномерный по интенсивности вдоль афтершоковой области; 2. Зоны разломов, субперпендикулярно секущие сдвиговую разломную зону, активизированную Чуйским землетрясением, разделяют афтершоковый процесс на элементы второго уровня; 3. Пересечения сдвиговой зоны разломами характеризуются пониженной сейсмичностью, а в промежутках между секущими разломами сдвиговая зона наиболее сейсмически активна; 4. Начиная с 2012 г. возникают смежные сейсмически активные локальные области в Айгулакском и Южно-Чуйском хребтах с сильнейшими землетрясениями с магнитудой $M_L = 6.0-6.1$; 5. К 2015-2016 гг. от этих областей вытянулись две сейсмически активные структуры субпараллельные области, охваченной афтершоковым процессом Чуйского землетрясения.

ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ЛИТОСФЕРЕ И ИХ УЧЕТ ПРИ ПРОГНОЗЕ И ПРЕДУПРЕЖДЕНИИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ В НЕДРОПОЛЬЗОВАНИИ

Я.И. Липин, Р.В. Криницын

Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург; stress.igd@mail.ru

Геодинамические процессы в литосфере происходят в результате преодоления сил сцепления действующими напряжениями. Поэтому параметры напряженного состояния пород являются одной из основных характеристик состояния и поведения недр. Институт горного дела УрО РАН за полувековой период провел определение напряженно-деформированного состояния (НДС) на 25 рудниках страны, в результате которого выявлены закономерности изменения напряжений с глубиной и в плане [Зубков, Липин, 1997; Зубков, Липин, Криницын и др., 2010].

За последние 20 лет наряду с измерениями напряжений нетронутого массива производится геодеформационный мониторинг на рудниках Урала от г. Краснотурьинска на севере до г. Гай на юге на глубинах от 400 до 1000 м в скальных породах вне зоны влияния очистных работ. Реперные линии длиной около 50 м по 4÷5 на каждом руднике ориентированы по различным азимутам. Применена технология гибких нитей, точность измерения до 0,2 мм, частота замеров 3-4 раза в год. На поверхности вблизи Екатеринбурга оборудован полигон с длиной баз 2,8÷5,4 км для измерения деформаций с использованием технологии GPS и геодезическим методом.

Анализ результатов измерения и геодеформационного мониторинга позволяет сделать следующие выводы:

1. Верхняя часть земной коры Урала испытывает периодические циклические вариации напряженного состояния. Период цикла составляет порядка 11 лет с амплитудой упругих деформаций до $(20\div30)\cdot 10^{-5}$ и напряжений до $10\div20$ МПа при $E_{cp} = 0,5\cdot 10^5$ МПа [Зубков, Липин, Криницын и др., 2010]. Рассматриваемый период изменения НДС соответствует солнечному наноциклу продолжительностью $10\div13$ лет [Абдусаматов, <http://www.qao.spb.ru>], за время которого происходит изменение радиуса Солнца до 250 км в «коротком» 11-летнем цикле и до 750 км в «большом» двухвековом цикле». Одновременное деформирование Земли и Солнца говорит о космическом характере рассматриваемого явления, а вариации показателей (солнечная постоянная, пятнообразовательная активность Солнца, интенсивность космических лучей) и их прогноз могут быть использованы для оценки уровня НДС Земной коры. При этом время тах первых соответствует min вторых.
2. Хронологический анализ аварий и катастроф в недропользовании показал, что большинство из них произошло в периоды min солнечной активности, то есть в периоды роста и действия тах горизонтальных сжимающих напряжений [Зубков, 2013], которые сыграли роль триггерного эффекта. В сфере недропользования (подземные рудники, бетонные плотины ГЭС, линейно-протяженные объекты и др.) триггерный эффект наиболее ярко выражается в первых, поскольку они размещены непосредственно в геосистемах, где происходит концентрация напряжений как вокруг выработок, так и около выработанных пространств и каньонов. Разрушению подвергаются в первую очередь породы с наиболее низкими параметрами прочности. Примером являются соляные рудники Прикамья, где произошли три аварии с затоплением подземных пространств [Липин, 2012; 2011].
3. Триггерному воздействию в первую очередь подвержены отдельные рудники, эффект в которых проявился при росте нагрузок за один наноцикл (БКРУ-3, 1986 г.; СКРУ-2, 1985 г.; БКРУ-1, 2006 г.). Более крупные геосистемы, такие как месторождения калийных солей (ВКМКС в России, размер 136x40 км; Саскичеван в Канаде, 700x100 км) подверглись триггерному эффекту, появляющемуся в вековом наноцикле физических явлений (60-90 лет). В хронологическом плане это случилось в 1985-1987 гг., когда начались затопления рудников соляных месторождений России и Канады. Геосистемы Каспийского моря (1000x300 км) и других замкнутых водоемов (Байкал, Ханка, Онега и др.) также подвержены триггерному эффекту. Уровень Каспийского моря, падавший до 1987 г., начал свое повышение и на фоне 11, 100- и 400-летних циклов СА будет на высоком уровне в ближайшей перспективе.
4. Особого внимания заслуживают результаты мониторинга поверхности с использованием GPS. Анализ показывает, что эти результаты составляют 3-5% истинных деформаций на глубине до 1000 м. В программе GPS радиус Земли принят неизменным и эта система при измерении вариаций линейных координат нуждается в корректировке.
5. Достоверность результатов геодеформационного мониторинга подтверждается как результатами измерений на рудниках Сибири (Абаза), аварийными ситуациями на соляных рудниках России, Канады и других рудниках, так экспериментальными работами по проектам ОПЕРА в Европе (база измерения скорости нейтрино 730 км), а также в Америке (база 805 км). Следовательно, триггерный эффект характерен для всей нашей планеты.
6. Использование результатов мониторинга для прогноза и корректировки уровня первоначальных напряжений с хронологической привязкой позволяет разработать схему механизма аварийного разрушения, определить время разрушения и разработать комплекс мер по предупреждению аварии на стадии разработки проекта. Результаты выполненных исследований, их подтверждение и очевидность напоминают о необходимости их всесторонней проверки, широкому применению при мониторинге и практике ведения работ, выявление особенностей деформирования отдельных геосистем, обеспечению безопасности на ближайшую перспективу, поскольку согласно выявленной хронологической зависимости предстоящие 2017-2021 и последующие 2028-2031 гг. заслуживают

пристального внимания. Работа выполнена в составе проекта № 15-2-5-22 «Адаптация стратегии добычи полезных ископаемых к условиям изменяющегося во времени напряженно-деформированного состояния Земной коры» комплексной программы исследований УрО РАН.

ТЕХНОГЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЛОВОЗЕРСКОГО РЕДКОМЕТАЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

А.В. Ловчиков

ФГБУН Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты; vocson@goi.kolasc.net.ru

Ловозерское месторождение разрабатывается рудником «Карнасурт» с 1951 года. Сейсмологические наблюдения на Кольском полуострове ведутся с 1956 года. До 90-х годов ни одного сейсмического события в районе отработки Ловозерского месторождения КРСЦ ГС РАН не зафиксировано. Тем не менее, Ловозерское месторождение первым из месторождений на Кольском полуострове отнесено Госгортехнадзором СССР к угрожаемому и опасному по горным ударам в 1978 г. В 1984 г. на месторождении был запущен в эксплуатацию новый рудник «Умбозеро» и вскоре после начала его работы, с 1991 г., возникла и стала резко нарастать сейсмическая активность массива месторождения. Выразилась она в том, что в массиве рудника «Умбозеро» возникали сейсмические события с магнитудой $M_L = 1.0-2.5$ (по Рихтеру), которые выражались в разрушениях выработок и целиков на руднике. Таких событий в 90-х годах происходило по десятку и более в год, не говоря о гораздо большем количестве мелких событий. Эксплуатация рудника «Умбозеро» «запустила» техногенную сейсмичность в Ловозерском массиве, которая со временем нарастала. Наконец, 17.08.1999 г. на руднике «Умбозеро» произошел сильнейший горно-тектонический удар: $M_L = 5.1$, выделенная сейсмическая энергия $E = 10^{11.8}$ МПа (по данным Геофизической службы РАН), в результате которого горные выработки рудника были разрушены на площади 650 тыс. м². Это сейсмическое событие явилось сильнейшим среди подобных за всю историю эксплуатации рудников и шахт России. Рудник был полностью остановлен и выведен из эксплуатации на 3 месяца. На полное восстановление руднику понадобился год. Частично вследствие последствий техногенного землетрясения 17.08.1999 г. рудник «Умбозеро» вскоре (в 2004 году) был закрыт.

Исследованиями Горного института КНЦ РАН установлено, что горно-тектонический удар 17.08.1999 г. на руднике «Умбозеро» был вызван одновременной отработкой двух сближенных залежей в высоко тектонически напряженном массиве, выемка которых осуществлялась камерно-целиковыми системами, то есть с пустыми отработанными камерами. После выемки камер на обеих залежах в междупласты создались большие концентрации сжимающих и растягивающих напряжений, вследствие чего в массиве проросла огромная трещина, достигшая дневной поверхности, сопровождающаяся горно-тектоническим ударом. Сразу после сильных сейсмических событий на руднике «Умбозеро» такие же события стали возникать и на другом руднике «Карнасурт», который находится в 10 км от рудника «Умбозеро». С начала 2000-х годов до текущего момента на руднике «Карнасурт» зарегистрировано более полутора десятков сильных сейсмических событий с магнитудами $M_L = 1.0-2.8$. Характерно, что все эти сильные события происходят на западном фланге шахтного поля рудника (на участке «Кедыквырпахк»). Мы объясняем происхождение этих событий структурно-блоковым строением Ловозерского массива. Западный фланг рудника «Карнасурт» находится в блоке III ранга, в котором расположен рудник «Умбозеро». Этот блок более высоко тектонически напряжен, чем соседние геолого-структурные блоки того же ранга. Таким образом, техногенная сейсмичность Ловозерского месторождения вызвана высокой тектонической напряженностью массива, его структурно-блоковым строением и применением систем с открытым очистным пространством, создающих большие концентрации напряжений вокруг выработок. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-05-04323).

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ШУМОВ GPS

А.А. Любушин

ИФЗ РАН, Москва; lyubushin@yandex.ru

Традиционный формат данных GPS представляет собой ежесуточные временные ряды, однако с февраля 2013 г. в интернете стали свободно доступны 3-компонентные данные GPS смещений земной поверхности с шагом по времени 5 минут. Общее число станций глобальной сети GPS в настоящее время превышает 11 тысяч и постоянно растет. Переход к 5-минутным данным и увеличение плотности сети позволяет исследовать качественно новые эффекты глобальной дрожи Земли, в том числе и для задач оценки текущей сейсмической опасности.

В докладе представлены результаты построения карт различных свойств шума GPS для регионов с наиболее плотной сетью станций: территорий Японии и США. Особое внимание уделяется картам свойств корреляции и когерентности шума, оцененных в скользящих временных окнах. При интерпретации результатов анализа используется гипотеза, что повышенная сейсмическая опасность сопряжена с увеличением корреляции или когерентности дрожи земной поверхности, а также с увеличением вклада низких частот.

Вывод по результатам анализа поля GPS шумов на Японских островах (2015-2016 гг.): основная текущая сейсмическая опасность сосредоточена в районе глубоководного желоба Нанкай, что создает существенную угрозу мегаполису Токио. Максимальная опасность в окрестности точки 34 град. СШ и 138 град. ВД. Этот результат является независимым подтверждением ранее сделанного вывода на основе анализа свойств сейсмического шума. Анализ свойств поля GPS шумов на территории США (2013-2016 гг.), в качестве «пятен сейсмической опасности», помимо Калифорнии выделяет район Нью-Мадридской сейсмической зоны (долина реки Миссури), где в 1811-1812 гг. произошла серия сильных сейсмических событий, магнитуда которых доходила до 8. Следует отметить, что оценка вероятности сильных землетрясений в Нью-Мадридской зоне традиционными методами, основанными на анализе сейсмических каталогов, затруднена вследствие малого числа событий в этом регионе, что повлекло за собой пониженное внимание к этой опасности.

ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ РУДАХ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ УПРУГИХ ВОЛН

З.-Ю.Я. Майбук

ИФЗ РАН, Москва; rim@ifz.ru

Известно, что массивы горных пород и руд обладают потенциальной энергией разной природы: механической, электрической, геохимической и др. При воздействии на них даже слабыми полями может высвободиться значительная энергия с необратимыми изменениями сложившегося квазистабильного состояния [Соболев, Демин, 1980; Соболев, Демин, Майбук, 1991]. В горных породах такие эффекты наблюдаются при изменении напряженного состояния и проявляются в виде сейсмических аномалий и разрушений. В рудных полиметаллических телах возникают сложные нелинейные механоэлектрические преобразования с генерацией электромагнитных импульсных сигналов (ЭМИ) в звуковом и радиоволновом диапазонах частот. Преобразования происходят при прохождении упругих волн (УВ) [Майбук, 2006]. При наличии минералов-пьезоэлектриков наблюдаются сигналы ЭМИ низкой частоты (НЧ), характеризующиеся совпадением в первом приближении частот УВ и ЭМИ, а также линейной зависимостью между их амплитудами. Например, на расстоянии 30-40 м от источника УВ основная энергия ЭМИ НЧ лежит в диапазоне частот 0.6-0.9 кГц. При нелинейном преобразовании частота сигналов ЭМИ на таких расстояниях может достигать 5-6 и более МГц (излучение высокой частоты (ВЧ)). Основное различие этих преобразований наблюдается в амплитуде сигналов и форме. Энергия ЭМИ ВЧ может превышать энергию НЧ сигналов на 1-2 порядка, а высокая частота указывает на небольшие размеры излучателей. [Майбук, 2006; Соболев, Майбук, 2013].

В настоящей работе предпринята попытка косвенно оценить коэффициент нелинейных преобразований путем сравнения энергии сигналов УВ, НЧ и ВЧ в руде природного залегания. Проведены лабораторные исследования серии (более 60) существенно сфалеритовых рудных образцов, измерили в них величину пьезомодуля на разных частотах и сравнили с пьезокварцевым эталоном. Сфалерит – минерал, обладающий линейными НЧ (пьезоэлектрическими) и нелинейными ВЧ преобразованиями. Образцы отбирались с рудного тела вскрытого горной выработкой и изученного скважинами. На данном теле организовали полигон и провели исследования пьезоэлектрических и радиоимпульсных сигналов с их одновременной регистрацией. Возбуждались УВ взрывами взрывчатого вещества массой 0.2 кг (подрыв в водной среде) на расстоянии 19 м на противоположной стороне полигона и в 8.6 м от границы руды. Всего провели 28 взрывов. Рудная зона выделялась сигналами ЭМИ, причем вступление низкочастотной эмиссии совпадало с границей руды, а радиоволновые сигналы мигрировали по всему объему, не выходя за границы оруденения, и практически не повторялись по амплитуде. Основная энергия НЧ сигналов в диапазоне 1.6-1.8 кГц, а ВЧ - 1.9-3,4 МГц. Анализ сигналов показал, что амплитуда УВ (регистрация велась на стенке полигона) отличалась на 15-17%. В сигналах ВЧ наблюдалось истощение энергии преобразования при воздействиях на рудное тело с периодом менее трех часов. Дополнительно провели четыре взрыва с бесконтактной поляризацией части руды, и амплитуда ВЧ сигналов при этом увеличилась в среднем на 20-30%. Анализ сигналов ЭМИ, НЧ и ВЧ с учетом амплитуд УВ показал коэффициенты преобразования - НЧ от 0.02 до 0.3, а сигналов ВЧ от 1.2 до 18.4 при возможной ошибке 10-20%. Если взять значения сигналов в экспериментах с дополнительной поляризацией, то даже с ошибками, энергия генерации ВЧ сигналов превышает энергию УВ. В отличие от пьезоэффекта, возникающего непосредственно в минералах-пьезоэлектриках, радиоволновое ВЧ излучение, возможно в меньшей степени зависит от минерального состава оруденений, а связано со сложным электрическим состоянием отдельных зон в объеме рудосодержащей породы, находящейся в условиях природного залегания, электрохимических реакций и градиента механических напряжений и при прохождении упругих волн в рудных телах наблюдаются триггерные эффекты.

ОТЗЫВ РУДОСОДЕРЖАЩЕГО МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ИМПУЛЬС

З.-Ю.Я. Майбук, Г.А. Соболев

ИФЗ РАН, Москва; rim@ifz.ru, sobolev@ifz.ru

Исследовались механоэлектрические преобразования в полиметаллических оруденениях, находящиеся в массиве горных пород. Массивы горных пород и руд обладают потенциальной энергией разной природы, которая при внешнем воздействии может приводить к изменению структуры, в том числе к разрушению [Садовский, 1999; Соболев, Пономарев, 2003].

В настоящей работе предпринята попытка вызвать высокочастотное электромагнитное излучение (ВЧИ) низкочастотными электрическими сигналами (НЧС) по профилю, пересекающему рудоносную зону. Экспериментальные исследования проводили на поверхности рудника “Эльбрус” (полиметаллическое серебросвинцовое месторождение в Карачаево-Черкесской Республике). Рудная зона выделялась видимым включением сульфидов. В качестве источника НЧС использовали батарейный прибор с конденсатором емкостью 10 мкФ, который заряжался до напряжения $U = 600$ В. Ток в виде прямоугольного импульса длительностью 2.5–3 мс поступал в землю через латунные электроды с разносом до 70 м и межэлектродным сопротивлением 1.2–1.4 кОм. Электромагнитная эмиссия регистрировалась антеннами с аппаратурой А-Line и прибором с платой NVL-45. Сигналы ВЧИ, вызванные НЧС, были зарегистрированы ранее на северном участке рудника [Майбук, 2006]. Здесь после 11 последовательных пусков тока НЧС с интервалами между ними более 20 мин было зарегистрировано несколько сотен ВЧИ; они характеризовались асимметричной импульсной формой с частотами 0.5–6 МГц. Было замечено, что при прохождении тока НЧС приемными антеннами регистрируются пачки электромагнитных импульсов как в рудной зоне, так и во вмещающей породе. После окончания прохождения тока возникают сигналы ВЧИ на протяжении десятков мкс с источниками, не выходящими за границы оруденения.

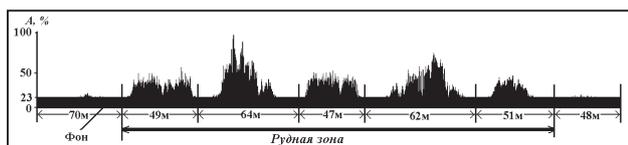


Рис. 1. Сигналы ВЧИ по профилю над рудной зоной (общая протяженность 391 м)

Была предпринята попытка пересечь рудную зону измерительным профилем с разносом электродов 45–70 м (рис. 1). В описываемом эксперименте длительность ВЧИ лежала в диапазоне от 0.6 до 28 мс, а длительность промежутков без зарегистрированных импульсов изменялась от 1.2 до 8.4 мс. Напряженность поля ВЧИ в основном составляла $E = 150–2000$ мкВ/м. Амплитуда ВЧИ была больше после окончания тока НЧС.

Выявленная в настоящей работе временная задержка возникновения ВЧИ относительно пуска тока не является необычным явлением. Запаздывание акустических сигналов при ударном воздействии на образцы горных пород и отклика сейсмичности, инициированной магнитными бурями, отмечалась неоднократно [Соболев, Пономарев, 2003]. Одной из причин может быть постепенное развитие неустойчивости в рамках кинетической теории разрушения твердых тел. Особый интерес представляет эмиссия ВЧИ радиоволнового диапазона частот от полиметаллических оруденений, где наблюдаются нелинейные преобразования при прохождении упругих волн звукового диапазона [Соболев, Майбук, 2013].

Подчеркнем следующие свойства зарегистрированных ВЧИ. Они возникают в зонах скопления сульфидов и окислов металлов, различаются по форме, их амплитуда не зависит от времени задержки после возбуждающего импульса. Времена вступления не повторяются при последовательных пусках тока. Высокая частота указывает на небольшие размеры излучателей. Под действием НЧС нарушается квазипостоянное электрическое состояние оруденений, и возникают локальные электрические пробои, сопровождаемые перераспределением электрического поля и излучением ВЧИ.

МЕДЛЕННЫЕ ВОЛНЫ ДЕФОРМАЦИИ КАК ТРИГГЕРЫ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ

П.В. Макаров^{1,2}, А.Ю. Перышкин²

¹ - Томский государственный университет,

² - Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск; pvm@ispms.tsc.ru

В науках о Земле за последние 40 лет получила развитие и широко дискутируется концепция деформационных волн Земли или «медленных движений», скорости которых на 6–7 порядков ниже скоростей звука и на 6–7 порядков выше типичных скоростей тектонических течений. Интерес к медленным движениям возрос в связи с тем, что перераспределения энергии в блочных средах, а также процессы активизации разломов в блочной геосреде стали связывать с медленными деформационными волнами. Таким образом, объектом изучения настоя-

щих исследований являются возмущения напряжённо-деформированного состояния в геосредах, которые интерпретируются как волна и распространяются от источника возмущения (как правило, это границы тектонических плит и разломы разных масштабов) с малыми скоростями, занимающими промежуточное значение между скоростями тектонического крипа и скоростями звука в геосреде. Скорости этих деформационных возмущений обычно составляют 1-100 км/год.

В последнее время рассматриваются различные математические модели и дискутируется идея, что медленные деформационные волны суть солитоны. Рассмотрение нагруженной геосреды, любого твёрдого тела, как многомасштабной нелинейной динамической системы, позволяет на математической базе механики деформируемого твёрдого тела успешно описывать наблюдаемые эффекты эволюции напряжённо-деформированного состояния, включая генерацию и распространение медленных деформационных автоволн. Развиваемая модель не требует привлечения дискуссионных и трудно аргументируемых применительно к геосредам представлений микрополярной теории.

ОСОБЕННОСТИ СТАТИСТИКИ ФЛУКТУАЦИЙ НДС ПРЕДКРИТИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ НАГРУЖЕННОЙ ПРОЧНОЙ СРЕДЫ

П.В. Макаров^{1,2}, И.Ю. Смолин^{1,2}, А.С. Кульков^{1,2}, М.О. Еремин^{1,2}, В.В. Поддубный¹

¹ - Томский государственный университет

² - Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск; smolin@ispms.tsc.ru

Выполнен статистический анализ данных пространственно-временной эволюции напряженно-деформированного состояния (НДС) перед катастрофическим разрушением для горного массива при проходке горной выработки и нагружаемых образцов горных пород, проведённый по результатам численных расчётов и экспериментальных данных. Выявленные изменения статистических параметров, имеющие общие черты во всех проведенных исследованиях, в комплексе можно рассматривать как предвестники катастрофического разрушения. В целом процесс деформации перед разрушением скоррелирован и отвечает состоянию динамического хаоса, а на отдельных участках, где коэффициент корреляции был высок, – состоянию самоорганизованной критичности.

В основе проведенного исследования лежит анализ временных рядов, отражающих эволюцию НДС нагружаемой среды вплоть до разрушения. В случае экспериментов по нагружению образцов горных пород анализировались данные об изменении скорости боковой поверхности образцов, полученные с применением лазерного доплеровского виброметра. В случае численных расчетов анализировали изменение во времени параметров НДС в выбранных точках расчетной области. Статистический анализ проводился разными методами. Кросскорреляционный анализ методом скользящего окна показал, что высокий уровень коэффициента корреляции стадии катастрофического разрушения с предшествующим процессом накопления повреждений наблюдается только на очень коротком временном интервале, приблизительно равном 8–10 временам выхода разрушения на критическую стадию. Спектральный анализ на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ сигнала) и 2D годограф комплексного вектора БПФ сигнала выявили фрактальную структуру процесса разрушения. Увеличенные фрагменты годографа ярко демонстрируют многомасштабность разрушения, увеличенные картины годографа качественно эквивалентны исходной картине. Причём, резкое изменение структуры годографа, свидетельствующее о нарастании масштабов разрушения, наблюдается только вблизи катастрофического события, поэтому его можно рассматривать как предвестник катастрофического разрушения. Вейвлет-анализ с применением симметричного вейвлета Добеши хорошо фиксирует короткие выбросы сигнала, отвечающие локальным разрушениям. Их нарастание по мере приближения к разрушению свидетельствует о приближении крупномасштабной катастрофы. Эволюция графиков функции распределения флуктуаций (PDF), уменьшение наклона амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в логарифмических координатах, графиков повторяемости сейсмических событий по мере приближения к катастрофическим разрушениям также являются предвестниками крупномасштабного разрушения.

Все выявленные предвестники разрушения и особенности эволюции НДС нагружаемой среды наблюдаются, в том числе, при анализе результатов численного моделирования процесса неупругого деформирования и разрушения горного массива в ходе ведения горных работ. Эти особенности эволюции в математической модели полностью совпадают с эволюцией реальных объектов – разрушаемых образцов горных пород. Неустойчивое развитие деформационных процессов при разрушении в экспериментах и при численном моделировании в случае использования эволюционного подхода, происходит по одному сценарию с совпадением всех этапов эволюции НДС, отраженных в АЧХ и PDF зависимостях.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ГЕНЕРАЦИИ АНОМАЛИЙ OLR ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ

А.А. Малашин¹, В.Л. Натяганов¹, С.А. Шопин²

¹-Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова; malashin_a@mail.ru

²- Тульский государственный университет

Механизмы объяснения аномалий OLR в зонах подготовки землетрясений, активно обсуждаемые в литературе: увеличение эманации радона в зоне разлома, выделение скрытой теплоты конденсации, образование кластерных ионов, тепловые потоки в атмосфере. Представленные механизмы не являются исчерпывающими для объяснения количественных характеристик излучения, наблюдаемых в экспериментах. При изучении аномалий OLR необходимо учитывать процессы, связанные с эманацией легких газов, в частности, водорода, теплообмен восходящих струй легких газов с атмосферой в зоне разлома. Одним из источников выделения тепла может являться переход ортоводорода в параводород при охлаждении вышедшего газа в восходящем потоке.

В схеме аномалий OLR учитывается, что при активизации сейсмических процессов в зоне разломов происходит интенсивная дегазация радиоактивного радона, в результате распада которого образуются α -частицы. Ионизация молекул воздуха происходит при взаимодействии с α -частицами. Водяной пар конденсируется на образовавшихся ионах, при этом выделяется скрытая теплота испарения, что в данной схеме является основным источником повышения температуры воздуха и образования теплового пятна. Оценки показывают, что данный механизм не может полностью объяснить ту мощность теплового излучения, которая фиксируется в данных, полученных со спутников. Изменение температуры на уровне верхней кромки облаков при данном процессе будет порядка $\Delta T = 0,3 \div 0,5$ К, что соответствует мощности излучения $\Delta J = 1 \div 4$ Вт/м². Обработка данных, полученных со спутников, показывает, что вариации мощности теплового излучения при аномалии OLR достигают $\Delta J = 20 \div 80$ Вт/м². Еще один механизм возникновения аномалий OLR - образование кластерных ионов. Энергию, которая выделяется в процессе образования крупных кластерных ионов, можно оценить по динамике изменения значения энергии связи между ионами и молекулами воды. Расчеты приводят к оценке изменения температуры $\Delta T = 0,2 \div 0,4$ К, и изменение мощности теплового излучения $\Delta J = 0,5 \div 3$ Вт/м². При моделировании аномалий OLR необходимо учитывать тепловой обмен в системе Солнце-Земля-Атмосфера. При подготовке землетрясений в зоне разлома происходит активная дегазация с образованием устойчивых облачных структур. Такие газы как метан, водяной пар поглощают часть излучения на определенных длинах волн и добавляют тепло в атмосферу, которая в свою очередь «переизлучает» его в виде OLR. При анализе аномалий OLR необходимо учитывать процессы, которые связаны с эманацией водорода, в частности необходим учет теплообмена между восходящим водородом и атмосферой, который приводит к $\Delta J = 0,2 \div 3$ Вт/м².

При нормальных условиях количество ортоводорода составляет 75% и параводорода - 25% от общего количества водорода. При охлаждении молекулы ортоводорода начинают переходить в параводород, при этом выделяется энергия. Это обстоятельство приводит к мысли о том, что существует еще один механизм возникновения тепловых аномалий при подготовке землетрясений. Переход ортоводорода в параводород может осуществляться помощью излучения, а также посредством реакции обмена при взаимодействии с молекулами воздуха. Реализация предложенного механизма, приводит к изменению температуры воздуха $\Delta T = 0,1 \div 0,3$ К, и мощности излучения в диапазоне $\Delta J = 0,3 \div 2$ Вт/м². Для более корректной оценки необходимо экспериментальное получение данных по изомерному составу водорода в зоне разлома.

СКАЧКООБРАЗНОСТЬ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ В ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

К.М. Мирзоев¹, А.В. Николаев¹, С.Х. Негматуллаев², Д.В. Симпсон³, А.А. Лукк¹, В.К. Мирзоев⁴, А.В. Дещеревский¹

¹- Институт физики Земли РАН, Москва

²- Геофизическая служба АН РТ, Дюшамбе

³- Инкорпорация IRIS США, Вашингтон

Рассматриваются скачкообразные пластические движения деформируемых образцов из различных материалов в лабораторных условиях, а также сейсмичности напряженных сред в естественных условиях залегания горных пород. Исследованы особенности деформации энергонасыщенных горных пород и характер крипа, зависимость его тонкой структуры от воздействия микросейсм, а также вибраций и колебаний воздуха. На примере исследований на Нурекской ГЭС изучена связь локальной сейсмичности с влиянием водосбросов, закачкой воды в скважины в зонах крупных разломов и добычи полезных ископаемых. Обнаружены эффекты разрядки тектонических напряжений вблизи Нурекской плотины водосбросами, что доказывает возможность регулируемой разрядки тектонических напряжений в земной коре.

Результаты сейсмических исследований на Ромашкинском месторождении в Татарии показали связь нефтеотдачи с земным приливом. Предложен метод повышения добычи нефти при режимах эксплуатации месторождения, согласованных с земным приливом.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ЛЕДНИКОВЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ «ВЫСОКОГО» ТЯНЬ-ШАНЯ (по сейсмическим записям Казахских станций мониторинга)

Н.Н. Михайлова

Институт Геофизических Исследований Республики Казахстан, Алматы; mikhailova@kndc.kz

Впервые вопрос идентификации природы класса необычных сейсмических событий, регистрируемых практически ежедневно, возник после открытия в Восточном Казахстане новой сейсмической группы Маканчи в 1999 году. Станция апертурой 4 км состоит из 9 элементов. Вся аппаратура расположена в скважинах на коренных породах. Место для станции выбрано достаточно тщательно, что позволило обеспечить высокую эффективную чувствительность этой станции как в отношении региональных, так и телесеизмических событий. Особенность обработки данных сейсмической группы состоит в том, что даже по одной группе можно локализовать эпицентры событий на основе использования f-k- анализа, поэтому удается установить местоположение очагов даже слабых землетрясений. Было замечено, что на записях группы встречаются очень похожие сигналы, число которых может достигать до 50–100 в день. Обычно это слабые записи. Вступление Р-волны, как правило, очень нечеткое. То, что все подобные записи относятся к источникам из одного и того же района, понятно из близости времен Ts-Tr, при стабильных значениях баказимута, определенного по данным f-k- анализа как по Р, так и по S – волнам. Эпицентры всех событий находятся на расстоянии от станции Маканчи примерно 500 км, диапазон азимутов на эпицентр составляет 185–190°. Эпицентры приурочены к так называемому «высокому» Тянь-Шаню. К нему относится та часть Центрального Тянь-Шаня, которая включает в себя большое число вершин высотой более 6000 м, на китайской территории вблизи границы с Кыргызстаном находится самая высокая точка – пик Победы (в Китае называется пик Томур) высотой 7439 м. Известно, что это сейсмически активный район, все происходящие здесь землетрясения коровые, абсолютное большинство имеет глубины менее 30 км. Сильных землетрясений за весь исторический период здесь не зарегистрировано.

Изучение распределения исследуемых землетрясений по энергетическим классам показало, что в абсолютном большинстве – это события с $K = 5-7$. График повторяемости по классам характеризуется большой крутизной, γ составляет более 0,9, что нехарактерно для тектонических землетрясений в Тянь-Шане. Меньшие по силе события здесь не регистрируются представительно. Дополнительный анализ непрерывных записей двух сейсмических групп Маканчи и Каратау с помощью метода РМСС (прогрессивная многоканальная корреляция) показал, что высокочастотный мощный источник сейсмических сигналов на станциях Маканчи и Каратау регистрируется, соответственно, в азимутах 190 и 90°. По этим данным он локализован в рассматриваемом районе Центрального Тянь-Шаня. Наблюдаются четкие суточные и сезонные вариации количества слабых сейсмических событий. Распределение времени в очаге T_0 по времени суток показало, что их практически вдвое больше в ночное время – с 19 часов вечера до 6 часов утра, чем в дневное. Ежегодно наблюдаются четкие вариации количества событий: при наличии общего тренда увеличения количества толчков от года к году практически каждый год наблюдается наименьшее количество таких землетрясений в летние месяцы, а с приближением зимы их количество нарастает. Вполне логично предположить, что такие изменения связаны с изменением температуры в течение суток и в течение года. Расположение области эпицентров таких землетрясений, как показали космические снимки, совпадает с расположением известных грандиозных ледников Западного Китая. Было сделано предположение, что регистрируемые события являются не тектоническими, а ледниковыми землетрясениями. Проведена классификация событий по волновой картине записей, отражающей разную физическую природу событий. Выделено, по крайней мере, два разных типа источников, генетически связанных с процессами в ледниках.

Практические рекомендации - необходимо исключать такие события из каталогов при анализе сейсмичности и в связи с задачами оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений. Желательно продолжение работ по исследованию ледниковых землетрясений по записям станций, установленных непосредственно в зоне ледников.

РЕАКЦИЯ МАТЕРИАЛОВ ГОРНЫХ ПОРОД НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ, ОТРАЖЕННАЯ В ДЕФОРМАЦИОННЫХ И АКУСТОЭМИССИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ

В.А. Мубассарова¹, Л.М. Богомолов², А.С. Закупин², И.А. Пантелеев³

¹ - Научная станция РАН, Бишкек; helmik69@gmail.com

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

³ - Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

Известно, что важнейшей характеристикой земной коры является ее блочно-иерархическая структура. Интервал масштабов, на которых выражена блочная структура, охватывает характерные размеры зерен, межзеренного пространства и пор, дислокаций и междислокационных расстояний в кристаллической структуре, с одной стороны и, с другой – блоки земной коры размером в сотни и тысячи километров. Главным свойством блочности среды на разных масштабных уровнях является ее самоподобие, проявляющееся в том числе в виде подобия сейс-

мической, сейсмоакустической и акустоэмиссионной активности. Исследования триггерных эффектов электромагнитных полей на натурном [Тарасов, 1997; Тарасов, Тарасова, 2011] и лабораторном [Соболев, 2003; Богомолов, Закупин, Сычев, 2011] масштабах, начатые в конце XX века, позволили сформулировать концепцию управляемой разрядки избыточных напряжений в геосреде, что до сих пор является довольно заманчивой перспективой. Несмотря на многочисленные примеры электромагнитного влияния на процесс деструкции геосред и наличие физических моделей (обзор в [Богомолов, Закупин, Сычев, 2011]), описывающих это влияние, вопрос о механизмах все еще остается открытым. Настоящая работа посвящена детальному исследованию реакции материала на электромагнитное воздействие, включающее комплексный анализ данных измерений акустической эмиссии (АЭ) и макродеформации образцов. Данные АЭ предусматривают анализ активности АЭ, накопления сигналов, распределения сигналов по энергиям (b-анализ) в зависимости от наличия или отсутствия электромагнитного влияния. Данные измерения осевой и поперечной деформации образцов используются для оценки влияния электромагнитного поля на скорость деформации, а также масштаба образованных в результате этого влияния дефектов. В результате комплексного анализа полученных данных можно сформулировать следующие выводы. Косвенный метод оценки скорости накопления дефектов (АЭ) является более чувствительным средством, позволяющим задолго до изменений в макродеформации обнаружить смену деформационного режима, вызванную действием поля. На участке деформирования до значений напряжений 0.7 от разрушения реакция материала в акустической эмиссии обнаруживается в 40% случаев, и только в 30% проявляется в изменениях скоростей деформации. По данным о количестве инициированных сигналов АЭ, отклики акустоэмиссионной активности имеют небольшую амплитуду, изменение b-параметра выявлено в 30% случаев, половина из которых коррелирует с приростами активности АЭ. При нагрузках выше 0.7 приросты активности АЭ зарегистрированы в 82% случаев электровоздействия, в 54% случаев наблюдаются статистически значимые изменения b-параметра и скоростей деформации. Выявленные особенности в перспективе могут сыграть ключевую роль в определении степени реализации того или иного механизма.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗОНЫ СУБДУКЦИИ ТОХОКУ. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭКЗОГЕННЫХ И ЭНДОГЕННЫХ ФАКТОРОВ

Д.С. Мягков

ИФЗ РАН, Москва; dsm@ifz.ru

Исследуется вопрос о формировании напряжённо-деформированного состояния (НДС) литосферы в районе зоны субдукции региона Тохоку (северное Хонсю). Данный регион характеризуется высокой сейсмичностью и наличием плотной сейсмологической сети, в результате чего достаточно детально изучена структура напряжённо-деформированного состояния земной коры региона. В рамках текущей работы представлены результаты численного моделирования НДС рассматриваемой области. Для решения поставленной задачи применялась явная конечно-разностная схема, разработанная Уилкинсом [Уилкинс, 1967] для исследования упруго-пластических тел и усовершенствованная Стефановым [Стефанов, 2005] для применения в геомеханике. Использовалась прямоугольная сетка, в начальном состоянии каждая ячейка имеет квадратную форму (общий вид модели представлен на рис. 1).

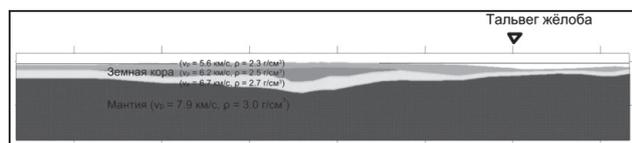


Рис. 1. Общий вид используемой модели

Задача решается в двумерной постановке, вид НДС относится к типу - плоская деформация. Тела модели рассматриваются как упруго-пластические, в качестве закона пластического течения используется модифицированная модель Друккера-Прагера-Николаевского [Николаевский, 1972].

В качестве факторов, обуславливающих формирование напряжённо-деформированного состояния модели, рассматриваются влияние мелкомасштабной астеносферной термогравитационной конвекции и горизонтальное сокращение литосферы (за счёт давления со стороны области спрединга – плейт-тектонический фактор), которые задавались в модели в виде соответствующих граничных условий. Предварительно рассчитывалось напряжённое состояние, формирующееся в модели за счёт гравитационных сил. В виде отдельного тела задавалась гидросфера. Дополнительно в модель вводилось влияние процессов эрозии, денудации и осадконакопления, с учётом специфики данных процессов выше и ниже уровня водной поверхности.

Результаты моделирования показали, что влияние мелкомасштабной конвекции приводит к формированию напряжённого состояния в большей степени схожего с данными тектонофизических реконструкций. Для плейт-тектонической модели, напротив, были получены противоречащие природным данным результаты. Исследования выполнены при поддержке РФФИ (проект № 16-05-01115).

ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ЛИТОСФЕРЕ МЕТОДАМИ АНАЛИТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Д.С. Мягков, Ю.Л. Ребецкий

ИФЗ РАН, Москва; dsm@ifz.ru

По результатам тектонофизических реконструкций [Ребецкий Ю.Л., Алексеев, 2014; Ребецкий, Кучай, Маринин, 2013] для орогенов Центральной Азии наблюдаются определённые закономерности напряжённого состояния данных структур. Важнейшая из них заключается в том, что в области поднятий наблюдается обстановка латерального сжатия, тогда как для межгорных долин характерно латеральное растяжение. Для изучения факторов формирования наблюдаемого напряжённо-деформированного состояния эпиплатформенных орогенов применялся метод аналитического моделирования.

Была взята аналитическая модель, представляющая собой бесконечно протяжённое латерально-периодическое тело, состоящее из двух слоёв, верхний из которых соответствовал земной коре, а нижний – мантийной литосфере. Задача исследовалась в двумерной постановке (модели представлены на рис. 1 и 2). Для тел модели была взята реология тела Максвелла, упругость учитывалась для процессов объёмного расширения и сжатия (сдвиговой частью упругих деформаций пренебрегали). Задача исследовалась для широкого диапазона параметров, основные результаты представлены для плотности 2.7 и 3.1 г/см^3 для коры и мантийной части соответственно, вязкости $-3.3 \cdot 10^{22} \text{ Па} \cdot \text{с}$ и $=3.3 \cdot 10^{20} \text{ Па} \cdot \text{с}$, модуля объёмного сжатия -3 и 10 ГПа .

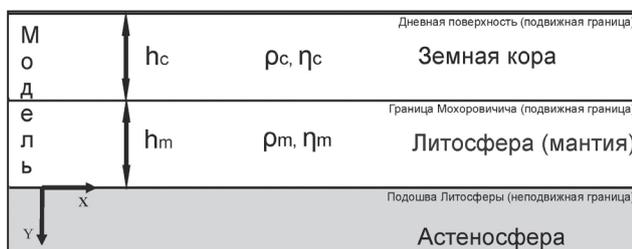


Рис. 1. Общий вид используемой модели для задачи о влиянии мелкомасштабной астеносферной конвекции

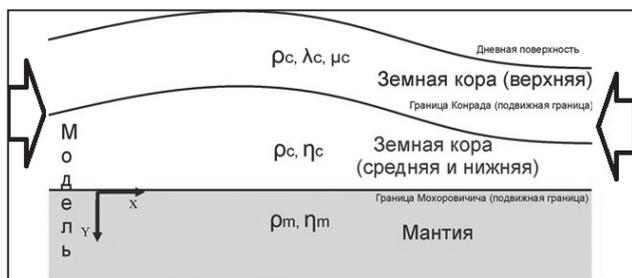


Рис. 2. Общий вид используемой модели для задачи о влиянии горизонтального сокращения литосферы

Рассматривались два основных фактора формирования напряжённо-деформированного состояния – влияние мелкомасштабной астеносферной термогравитационной конвекции [Мягков, Ребецкий, 2016] и горизонтальное сокращение литосферы (за счёт давления со стороны Индийской плиты – плит-тектонический фактор), которые задавались в модели в виде соответствующих граничных условий. Отдельно исследовалась проблема влияния денудационно-аккумуляционных процессов, протекающих на поверхности геологической среды, на вид формирующегося напряжённого состояния. Данные процессы учитывались при моделировании, были исследованы особенности их влияния на состояние модели при различной математической форме их задания.

Результаты моделирования показали, что модель с влиянием мелкомасштабной астеносферной конвекции даёт значительно более соответствующий природным данным результаты, чем плит-тектоническая модель. При этом существенный вклад вносит учёт упругой сжимаемости, без учёта которой не удастся получить вышеназванного соответствия.

Показано также, что учёт влияния экзогенных процессов приводит к существенному росту (вплоть до порядка) скорости течения и напряжений в верхней части модели, соответственно чему вопрос правильного учёта процессов денудации и осадконакопления приобретает особую значимость.

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МАГМАТИЧЕСКИХ СТРУКТУР ВУЛКАНА ЭЛЬБРУС ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ЛИТОСФЕРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ БАКСАНСКИМ ЛАЗЕРНЫМ ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ-ДЕФОРМОГРАФОМ

А.В. Мясников, В.К. Милюков

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Государственный Астрономический Институт им П.К. Штернберга, Москва; andrey0405@mail.ru

В течение 12 лет (с ноября 2004 года) ведется запись в режиме непрерывного мониторинга литосферной деформации 75-ти метровым лазерным интерферометром-деформографом, установленным в штольне Баксанской Нейтринной Обсерватории РАН на территории КБР (п. Нейтрино). Разрешающая способность

прибора $2.3 \cdot 10^{13}$, измерения проводятся в условиях высокого вакуума в частотном диапазоне, охватывающем как длиннопериодные лунно-солнечные приливы, так и высокочастотный сейсмический шум самой разной природы. Кроме того, что сам регион относится к наиболее геодинамически активным районам России, на расстоянии 18 км от деформографа находится полигенный стратовулкан Эльбрус.

Основной результат, который выносится на обсуждение, следующий. Был предложен так называемый резонансный метод, позволяющий сделать оценку характерного размера близповерхностной магматической камеры Эльбруса. Суть метода основана на выявлении и оценке резонансных свойств внутренних магматических структур вулкана. Так внешняя, достаточно мощная, сейсмическая волна возбуждает резонансные структуры и таким образом генерируются вторичные волны на собственных частотах этих структур. Основное отличие такой вторичной волны от первой сейсмической - в характере ее спектра. Частотный спектр резонансной структуры имеет выраженный линейчатый вид с модами определенной добротности на определенных частотах. Выявление в деформационной записи подобного спектра после землетрясения указывает на регистрацию резонансного объекта. Самая низкочастотная мода линейчатого спектра (как правило, и самая мощная) позволяет дать оценку размера этой резонансной структуры. Оценка добротности резонансных мод позволяет идентифицировать объекты и различать их физическую природу.

В результате наблюдения сейсмических сигналов от ряда землетрясений были зарегистрированы вторичные волны, излученные магматической камерой Эльбруса. Статистическая обработка спектров вторичных волн позволила выявить диапазон резонансных колебаний магматической камеры в интервале периодов 55-68 сек. Согласно полученным данным в рамках сферической модели максимальный размер камеры вулкана Эльбрус можно оценить как 8.8 км.

НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ – МИФ ИЛИ РЕАЛЬНОСТЬ В УСЛОВИЯХ ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА

Л.И. Надежка^{1,2}, А.Е. Семенов^{1,2}, И.Н. Сафронич^{2,1}

¹ - Федеральный исследовательский центр Единая геофизическая служба РАН, Воронеж

² - Воронежский государственный университет

За 20 лет наблюдений на территории Воронежского кристаллического массива (ВКМ) зарегистрировано более 500 местных землетрясений, в основном, не высокого энергетического класса ($K_p = 2.0-11.0$). Вместе с тем, в регионе функционирует более 20 промышленных карьеров, в которых добываются полезные ископаемые с применением взрывных технологий. Наиболее мощные взрывы производятся в карьерах Курского мегаблока. Известно, что короткозамедленные химические взрывы в карьерах существенно влияют на геологическую среду и в определенных геологических условиях могут инициировать землетрясения, то есть стать причиной наведенной сейсмичности [Взрывы и землетрясения..., 2013; Адушкин, Спивак, Соловьев и др., 2000]. Анализ временного распределения взрывов в крупных карьерах и количества местных землетрясений на территории ВКМ показывает, что после производства крупных взрывов увеличивается количество землетрясений (рис. 1).

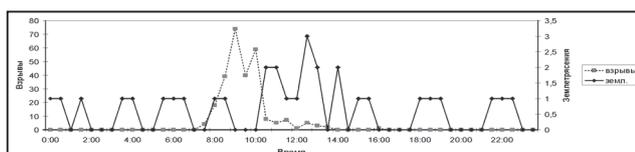


Рис. 1. Временное распределение взрывов и распределений на 2014-2016 гг.

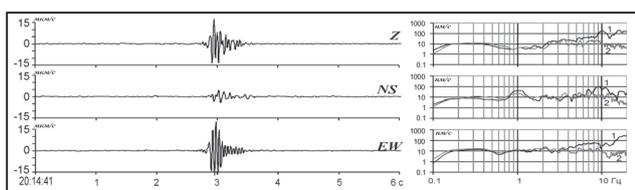


Рис. 2. Пример записи импульсного события, произошедшего после взрыва в Павловском карьере; а – волновые формы; б – амплитудно-частотный спектр; 1 – событие; 2 – фон

На рис. 1 представлены данные за 2014-2016 гг. В работе [Надежка, Ипполитов, 2007] ранее выполнялся аналогичный анализ за период 2003-2006 гг. Особенности сохраняются, что указывает на стабильность тенденции увеличения количества землетрясений после проведения крупных взрывов. Это можно рассматривать как свидетельство наведенной сейсмичности.

Специально выполненный эксперимент по анализу влияния промышленных взрывов на характер сейсмичности показал, что в сейсмически активной Лискинской зоне после взрыва в Павловском карьере наблюдалась серия сейсмических событий импульсного типа (рис. 2). Сейсмические события произошли спустя 6 часов после взрыва и следовали друг за другом в течение 3 часов. Всего за это время произошло 8 событий.

В других структурах подобный эффект не наблюдался. Из сказанного можно сделать вывод, что взрывы в промышленных карьерах, безусловно, влияют на состояние геологической среды и могут инициировать местные землетрясения. Однако сейсмические события, спровоцированные взрывами, могут реализовываться только в геодинамически активных зонах.

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Л.А. Назаров¹, Л.А. Назарова¹, Н.А. Мирошниченко¹, А.В. Панов¹, Л.В. Цибилов²

¹ - Институт горного дела СО РАН, Новосибирск

² - Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск

Предложен метод поэтапного решения краевых задач механики горных пород на основе иерархической последовательности пространственных моделей. Граничные условия на первом, глобальном уровне, формулируются по косвенной (сейсмотектонической и геодезической) информации, позволяющей дать интегральную оценку абсолютных значений и приращений горизонтальных компонент природного поля напряжений верхней части земной коры. На втором (региональном) и третьем (локальном) уровнях для этой цели используются результаты расчетов с предыдущих иерархических уровней, уточняемые по данным измерений *in situ* параметров геомеханических полей. Реализация подхода выполнена с использованием метода конечных элементов (сферическая и декартова системы координат, контакт-элементы для описания межблочного взаимодействия) для объектов «Центральной Азия и ее обрамление», «Алтае-Саянская складчатая область» и «Таштагольское железорудное месторождение». Теоретически обоснован новый подход для выявления количественных связей между параметрами пространственно-временного распределения техногенной сейсмичности (количество, энергия и местоположение очагов динамических событий - стохастическая информация) и напряженного состояния геотехнических объектов (приращения инвариантов тензора напряжений - детерминированная информация) при ведении горных работ. Для этой цели проведена серия лабораторных экспериментов по квазистатическому нагружению горных пород по схеме «бразильская проба» с одновременной записью микросмещений на поверхности дисковых образцов методом спекл-фотографии. На каждой стадии нагружения по зарегистрированному полю смещений с помощью триангуляции рассчитывалось распределение микродеформаций. Многопараметрический корреляционный анализ позволил выявить статистически значимую связь между местоположением и количеством зон концентрации микродеформаций (с которыми ассоциировались «очаги сейсмических событий») и вторым инвариантом поля макронапряжений, которое рассчитывалось по аналитическому решению о распределении статических напряжений в круговой упругой области, сжимаемой жесткими плитами в диаметральной направлении.

Предложенный подход апробирован с использованием базы данных техногенной сейсмичности Таштагольского железорудного месторождения (около 25000 событий с энергией от 1 Дж до 10 МДж, 1989-2014 гг.) и детальной 3D геомеханической модели, описывающая эволюцию полей напряжений в процессе выемки запасов за последние тридцать лет. *Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-05-06977).*

ОБЛАЧНЫЕ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ: ОТ АНАЛИЗА КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ К ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ МОДЕЛЯМ

В.Л. Натяганов¹, А.Н. Скибицкий¹, И.В. Степанов¹, С.А. Шопин²

¹ - Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

² - Тульский государственный университет

По эмпирической схеме краткосрочного прогноза [Дода, Натяганов, Степанов, 2013] облачные сейсмотектонические индикаторы (ОСТИ) являются новым и наиболее информативным типом предвестников землетрясений, которые позволяют локализовать место и рассчитать потенциальную магнитуду готовящихся сейсмособытий. Эффективность эмпирической схемы [Дода, Натяганов, Степанов, 2013] подтверждена патентом РФ на изобретение «Способ краткосрочного прогноза землетрясений» за № 2611582 от 28.12.2017 г. Морфологическая классификация основных типов ОСТИ (линейные, угольковые, 3-х и 4-х угольные, гребенчатые...) проведена в диссертации [Степанов, 2011], а в докладе эти типы будут представлены характерными примерами на космических снимках.

Рассматривается дегазационная модель формирования ОСТИ над протяженными подводными литосферными разломами (по границам литосферных плит) на основе МГД-уравнений [Щербинин, 1973] для плоских затоп-

ленных струй в приближении пограничного слоя. Задача при этом распадается на две части: подводную и надводную. Для подводной части предполагается, что электропроводность морской воды линейно связана с продольной скоростью в зоне затопленной дегазационной струи. При выходе этой струи с пузырьками газа и налипшими заряженными микрочастицами в атмосферу проводимость считается постоянной и рассматривается схема типа струйного течения из сопла конечной ширины при наличии спутного потока с морской поверхности до высот с температурой точки росы, где и начнется процесс конденсации. Обсуждаются физические механизмы конденсации или испарения облачных капель [Natyaganov, Doda, Stepanov et al., 2013] в формирующихся ОСТИ на взвешенных в дегазационных струях заряженных микроаэрозолях. При ясном небе и интенсивной дегазации это обычно приводит к образованию линейных или уголковых ОСТИ, трассирующих подводные литосферные разломы; а при сильной облачности могут возникать ОСТИ в виде щелей ясного неба типа провалов или каньонов в облачности [Степанов, 2011; Natyaganov, Doda, Stepanov et al., 2013].

Полученные теоретические формулы и выводы сравниваются с результатами прямого численного моделирования водородной дегазации из наземных литосферных разломов на основе системы уравнений Эйлера и конвективной диффузии, выполненных в ходе работ по госконтракту Минобрнауки (№ 14.577.21.0109, УИП RFMEFI57714X0109).

НЕМАТЕРИАЛЬНОЕ ЭКЗОГЕННОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ И СЕЙСМИЧНОСТИ

А.В. Николаев

ИФЗ РАН, Москва

Исследованиями микросейсм, землетрясений, акустических шумов на поверхности земли и в скважинах обнаружена их связь с астрособытиями: летним и зимним солнцестоянием, днями весеннего и осеннего равноденствия, восходом и заходом за горизонт Солнца и Луны, связи сейсмичности с эфемеридами планет, затмениями Луны и Солнца. Влияние астрособытий на теллурические явления имеет региональный изменчивый характер. Наиболее достоверные результаты получены по нескольким сейсмоактивным районам мира – Кавказ, Калифорния, Япония для слабых землетрясений магнитудой 3-5. Наблюдения микросейсм и акустических шумов выполнены в 2004-2016 гг. на нескольких сейсмостанциях, выявлено триггерное влияние небесных тел на теллурические процессы – землетрясения и микросейсм, акустическую эмиссию. Наши экспериментальные результаты объяснены нематериальным воздействием астрособытий и находятся в согласии с независимыми исследованиями других ученых в России, США, Греции.

Воздействие нематериальных полей на геофизические процессы непосредственное и опосредованное. Взаимная связь геофизических полей различной природы, «перекрестные эффекты» пока не изучены, предложено направить дальнейшее исследование на изучение воздействия нематериальных полей на геофизические процессы.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ТОКА В РАЗЛОМНОЙ ЗОНЕ

В.А. Новиков, В.Н. Ключкин, В.Ю. Рикман

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва; novikov@ihed.ras.ru

Представлена методика и результаты физического моделирования растекания электрического тока в неоднородной среде с низкоомными включениями. Методика основана на сопоставлении распределения плотности тока в модели, имеющей разлом, с ее распределением в модели без разлома. Моделью служит бак размером 1,0x1,0x0,5 м (рис. 1). Для модели без разлома бак заполнялся 1% водным раствором соли до уровня 0,4 м. Использовалась 4-х электродная установка ВЭЗ АМNB (рис. 2). Через электроды АВ пропускался переменный ток (1 кГц) с измерением напряжения на электродах MN, тока через электроды АВ и температуры воды. Вычислялось кажущееся сопротивление воды и нормированная плотность тока между электродами MN с введением поправок на температуру воды. Нормированная плотность тока не зависит от сопротивления воды и является функцией геометрических параметров электродной установки АМNB и ее положения в модели. Выполнены измерения плотности тока при различных параметрах электродной установки и ее расположения в модели. Для моделирования распределения тока для модели с разломом бак был заполнен блоками газобетона, предварительно насыщенными 1% водным раствором соли. В середине бака блоки имеют зазор шириной 90 мм, имитирующий разлом. Зазор был заполнен 0,1-1,0% водным раствором соли. Глубина воды в баке и высота блоков равны 0,4 м. Использована методика измерений, аналогичная методике для модели без разлома. Нормированная плотность тока для модели с разломом зависит от геометрических характеристик разлома, от соотношения сопротивления воды в разломе и сопротивления блоков и от геометрических параметров электродной установки АМNB и ее положения в модели. Результаты моделирования показывают увеличение плотности тока в имитаторе разлома (максимум ~ на порядок) в зависимости от отношения сопротивления блоков и воды в имитаторе разлома.

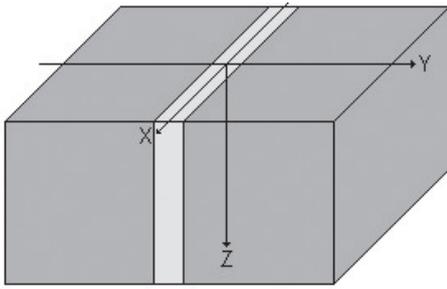


Рис. 1. Модель с имитатором разлома

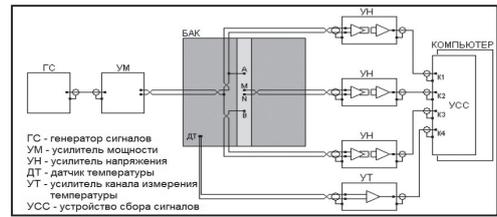


Рис. 2. Функциональная схема установки

ВЛИЯНИЕ НОРМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ В ИМИТАТОРЕ РАЗЛОМА НА ТРАНСФОРМАЦИЮ РЕЖИМА ЕГО СКОЛЬЖЕНИЯ

В.А. Новиков¹, Г.Г. Кочарян²

¹ - Объединенный институт высоких температур РАН, Москва; novikov@ihed.ras.ru

² - Институт динамики геосфер РАН, Москва

Выполнено исследование влияния характеристик заполнителя на характер сдвигового деформирования имитатора разлома на установке С-2 ОИВТ РАН (рис. 1). Проведены эксперименты по сдвиговому деформированию контактной зоны, заполненной кварцевым песком с размером частиц < 0,2 мм в диапазоне нормальных давлений σ_n от 10 до 145 кгс/см² при максимальном усилии сдвигового деформирования 10 кН. Показано, что до $\sigma_n \sim 15$ кг/см² в зоне деформирования наблюдается крип, который при повышении нормального усилия $F_{\text{норм}}$ переходит в прерывистое скольжение. Установлено, что уже при $\sigma_n > 15$ кг/см² в контактной зоне происходит дробление и перетирание частиц песка, что приводит к изменению жесткости разлома и режима его скольжения.

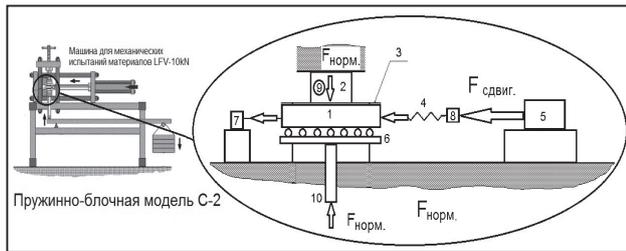


Рис. 1. Схема пружинно-блочной модели С-2 на основе машины для механических испытаний материалов LFV-10kN для экспериментов при высоком нормальном давлении в контактной зоне (до 1000 бар).

1 – подвижный блок, 2 – неподвижный блок, 3 – дисперсный наполнитель межблочного контакта, 4 – пружина, 5 – силовой привод LFV-10 kN, 6 – роликовая опора качения РОД-102, 7 – индукционный датчик перемещения подвижного блока, 8 – датчик сдвигового усилия машины LFV-10 kN, 9 – датчик ВЧ акустической эмиссии ПАЭ ПГ20-200 (20–200 кГц), 10 – шток рычажной системы нормального нагружения подвижного блока; $F_{\text{норм}}$, $F_{\text{сдвиг}}$ – нормальное и сдвиговое усилия

При $\sigma_n \sim 30$ кг/см² (рис. 2) в начале эксперимента прерывистое скольжение происходит в виде событий медленного скольжения. Затем, по мере разрушения (перетирания) частиц песка до размеров 5-50 мкм, время событий медленного скольжения сокращается, и режим деформирования постепенно переходит в регулярные подвижки (слипы). Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-05-00694А).

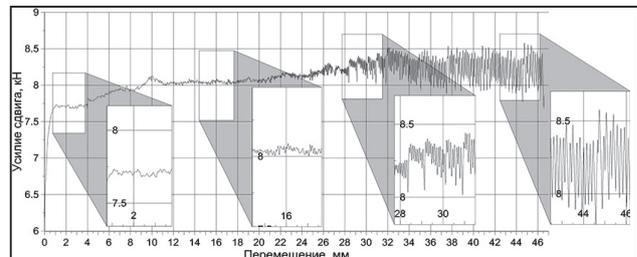


Рис. 2. Переход крипа в "стик-слип" при нормальном давлении 29,4 кг/см², площадь контакта 48 см², подвижный и неподвижный блоки из базальта. Заполнитель – строительный песок с размером частиц < 0,2 мм. Скорость перемещения конца пружины, соединенного с приводом, 1 мкм/с. Жесткость пружины 3,235 кН/мм

О ВОЗМОЖНОСТИ ТРАНСФОРМАЦИИ РЕЖИМА «СТИК-СЛИП» В КРИП ЗА СЧЕТ ИНЖЕКЦИИ ВОДЫ В РАЗЛОМНУЮ ЗОНУ

В.А. Новиков¹, Г.Г. Кочарян²

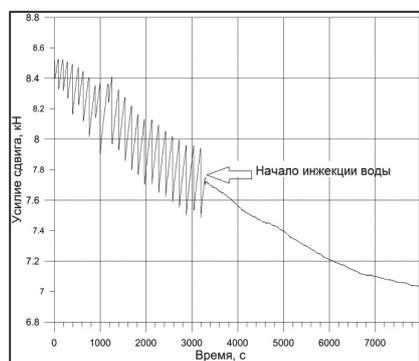
1 - Объединенный институт высоких температур РАН, Москва; novikov@ihed.ras.ru

2 - Институт динамики геосфер РАН, Москва

Проведено экспериментальное исследование возможности контролируемого изменения режима деформирования разлома – перевод скольжения разлома из режима «стик-слип» в режим событий медленного скольжения

или крива при помощи инъекции воды в зону межблочного контакта на пружинно-блочной модели С-2 (описание на стр. 68) при нормальном давлении (5,3 МПа) без заполнителя межблочного контакта и с заполнителем (кварцевый песок, каменная соль NaCl и глина). Для данных экспериментальных условий получено, что как для межблочного контакта «базальт по базальту» без заполнителя, так и с заполнением контакта кварцевым песком инъекция воды в контактную зону не приводит к заметному изменению режима ее деформирования, который даже при полностью обводненной контактной зоне практически не отличается от режима «сухого» деформирования. При заполнении контактной зоны каменной солью (размер частиц < 125 мкм) подача воды в зону контакта приводит к увеличению сброса сдвигового напряжения почти в два раза.

Радикальное изменение режима деформирования межблочной контактной зоны при подаче в нее воды достигается только при ее заполнении глиной (размер частиц < 0,2 мм). Вначале идет процесс уплотнения глины



со снижением максимального сдвигового напряжения перед подвижкой блока за счет формирования глиняной пленки в контакте (рис. 1). После подачи воды при $t = 3300$ с при сдвиговом напряжении 0,975 от критического значения произошел переход от режима «стик-слип» к крипу с последующим падением сдвигового напряжения в контактной зоне. *Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 16-05-00694А).*

Рис. 1. Режим деформирования межблочного контакта базальтовых блоков, заполненного дисперсной глиной с размером частиц < 0,2 мм. Нормальное напряжение $\sigma_n = 9,7$ МПа. Скорость перемещения конца пружины, соединенного с приводом, 1 мкм/с. Жесткость пружины 3,235 кН/мм

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ НА СЕЙСМИЧЕСКИЙ ЦИКЛ

В.А. Новиков, В.И. Окунев, В.Н. Ключкин

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва; novikov@ihed.ras.ru

На основе полевых наблюдений пространственно-временного перераспределения сейсмичности после искусственной инъекции импульсов электрического тока в земную кору [Тарасов, Тарасова, Авагимов, Зейгарник, 1999] было сделано предположение о возможности регулируемого изменения сейсмического режима электрическими/электромагнитными воздействиями на очаг землетрясения [Зейгарник, Авагимов, Тарасов, 1999]. В данной работе представлены результаты лабораторных исследований влияния электрических импульсов, подаваемых в имитатор разломной зоны, на сейсмический цикл (медленное накопление и резкий сброс напряжений при землетрясении) на пружинно-блочной модели, имитирующей сейсмогенный разлом земной коры. Используемая пружинно-блочная модель и методика эксперимента описаны в работе [Новиков, Окунев, Ключкин, 2015]. Показано, что в экспериментах с электрическим воздействием на зону контакта между подвижным и неподвижным блоками пружинно-блочной модели, заполненной гранулированным материалом (параметры электрического тока: частота 6 Гц, амплитуда 2,16 мА) энергия, выделяющаяся в системе при подвижках блока, увеличивается примерно на 40% по сравнению с экспериментами без электрического воздействия, при этом максимальное усилие сдвига и общее количество подвижек снижаются ~ на 20%.

ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ В НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫХ ОБРАЗЦАХ ГОРНЫХ ПОРОД

В.А. Новиков, В.И. Окунев, В.Н. Ключкин

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва; novikov@ihed.ras.ru

Представлены результаты регистрации акустической эмиссии (АЭ) и электрических сигналов (ЭС) при разрушении образцов природных геоматериалов на рычажном прессе. В процессе эксперимента сигналы АЭ регистрировались высокочастотным датчиком ПАЭ ПЭГ 20-200 № 5. Через широкополосный усилитель сигнал подавался на АЦП USB-3000 и далее на ПК. Для регистрации электрических импульсов был разработан и изготовлен усилитель электрических сигналов (УЭС) с четырьмя уровнями усиления от 100 до 800 и двумя фильтрами: низкочастотным от 5 до 200 кГц и высокочастотным от 5 кГц до 100 Гц. В экспериментах использованы образцы из розового известняка (200x100x40 мм) без следов регулярной трещиноватости. Плотность образца 2,43 кг/дм³, открытая пористость - 12,8%, закрытая пористость - 3,8%. Скорость акустического поля 4300±50 м/с. Образцы выдерживали

одноосную нагрузку до 300-350 кгс/см². Нагрузка на образец ступенчато менялась от 200 до 16000 кгс. После каждого этапа нагружения в течение нескольких минут регистрировались на ПК сигналы АЭ и ЭС.

Анализ спектров акустических и электрических сигналов показал, что акустические сигналы имеют максимумы на частоте 46,9; 70,3 и 125 кГц, а электрические сигналы – на частотах 54,7; 70,3; 78,1; 101,6; 125; 171,9 и 195,3 кГц. Оценки показывают, что с учетом весьма низкой амплитуды электрических сигналов (макс. 30 мВ) и диапазона частот 50-200 кГц, затухание сигналов в горных породах будет происходить на расстоянии менее 1 м от источника (трещины) и такие сигналы не могут регистрироваться на поверхности земли в качестве индикатора изменения напряженно-деформированного состояния земной коры в очаге землетрясения.

УНЧ/КНЧ СИГНАЛЫ В ИОНОСФЕРЕ ВЫШЕ МАКСИМУМА ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГРОЗОВАЯ АКТИВНОСТЬ

Н.С. Носикова^{1,2}, Н.В. Ягова², В.А. Пилипенко^{2,3}, В.В. Сурков⁴, А.Ю. Щекотов²

¹ - НПК «СПП», ИФЗ РАН, Москва; natanosik@yandex.ru

² - ИФЗ РАН, Москва; nyagova@yandex.ru, checkit@post.ru

³ - ИКИ РАН, Москва; pilipenko_va@mail.ru

⁴ - НИЯУ «МИФИ», Москва; surkovvadim@yandex.ru

Как известно, грозовые разряды являются источником электромагнитного излучения в широком частотном диапазоне. Распространяясь в электронейтральном волноводе, образованном поверхностью Земли и нижним D слоем ионосферы, электромагнитные волны в диапазоне частот 8-50 Гц образуют стоячую волну - шумановские резонансы (ШР), которые наблюдаются в любое время, в любой точке земного шара. При наблюдении ШР, наряду с фоновым сигналом, генерируемым глобальной грозовой активностью, выделяются отдельные всплески, являющиеся откликом на локальные молниевые разряды. В литературе встречается несколько публикаций, в которых сообщается о наблюдении на спутниках сигнала в диапазоне 8-50 Гц, который может быть интерпретирован как ШР (например, [Simões, Pfaff, Freudenreich, 2011; Dudkin, Pilipenko, Korepanov et al., 2014; Ni, Zhao, 2005; Nosikova, Yagova, Pilipenko et al., 2016], Теоретические расчеты [Surkov, Nosikova, Plyasov et al., 2013] показывают, что электромагнитное возмущение может проникать в ионосферу через верхнюю границу резонатора, причем амплитуда сигнала в области высоких широт выше, чем в экваториальной области, несмотря на значительное удаление от мирового центра глобальной грозовой активности.

В работе [Nosikova, Yagova, Pilipenko et al., 2016] были проанализированы данные магнетометра низкоорбитального спутника CHAMP и наземной станции Карымшино в диапазоне первого максимума ШР. Было обнаружено усиление сигнала на частотах 8 и 11 Гц, однако суточный ход частоты наблюдения выделенных сигналов не совпал с суточным ходом глобальной грозовой активности. Для ответа на вопрос о вкладе локальных гроз в электромагнитное возмущение герцового и миллигерцового диапазонов в настоящей работе были проанализированы данные магнетометра со спутников SWARM. Были отобраны события, когда хотя бы один спутник пролетает над областью молниевых разрядов. Совместный анализ данных с 3 спутников позволяет разделять пространственные и временные вариации электромагнитного поля.

ПРИРОДА МАССОВОГО РАЗРЫВООБРАЗОВАНИЯ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВИЗАЦИИ В ЦЕНТРАЛЬНОМ КУЗБАССЕ

А.Н. Овсяченко, Е.А. Рогожин, А.С. Ларьков

ИФЗ РАН, Москва

Изучены нарушения земной поверхности, в большом количестве возникшие в г. Полысаево и его окрестностях за годы низкомагнитудной, мелкофокусной роевой сейсмической активизации. Основным объектом проведенных полевых сейсмотектонических исследований явились разрывные нарушения земной поверхности (рисунок). Помимо бессистемных, рассредоточенных просадок, провалов и трещин, связанных с оседаниями земной поверхности над отработанными шахтными полями, наблюдаются линейные нарушения земной поверхности, образующие закономерные структурные рисунки (парагенезы) и выстраивающиеся в линейную систему общей длиной 7,6 км. Закономерные структурные парагенезы и сбросо-сдвиговые смещения по разрывам, достигающие по амплитуде первого десятка сантиметров, позволяют рассматривать их в качестве поверхностных тектонических разрывов. Кроме того, многие разрывы четко вписаны в деформации молодых форм рельефа. Можно предположить, что описанная система разрывов заложила на самом последнем этапе геологического развития района, имеет незначительную амплитуду смещения в недрах, и на отдельных участках использовала

наиболее хрупкий субстрат разреза – пласты каменного угля. Глубина гипоцентров землетрясений по инструментальным данным достигает 5 км, то есть гораздо глубже шахтных полей, расположенных на глубинах до 500 м. Можно полагать, что суммарный эффект сейсмической активизации привел к образованию сейсмотектонических деформаций в зоне уже имеющегося геологического разлома, так как описанная система трещин на отдельных участках демонстрирует закономерности, свойственные сейсморазрывам. Отличие разрывов от типичных сейсмотектонических нарушений, образующихся быстро, со скоростью в первые км/сек, заключается в их постепенном формировании. Ориентировочное время начала образования разрывов – несколько лет назад, с постоянным подновлением вплоть до настоящего момента, то есть по мере развития сейсмического процесса. Другим отличием является то, что поверхностные разрывы отдалены от облака эпицентров слабых толчков на расстояние 1.5-3.0 км к западу и приурочены в целом асейсмичной зоне разлома.

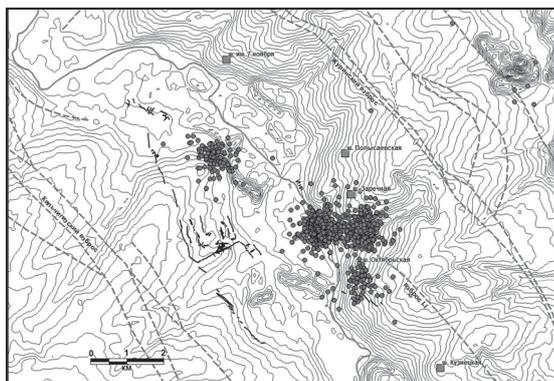


Рис. 1. Схема расположения эпицентров землетрясений зарегистрированных детальной сетью АСФ ФИЦ ЕГС РАН за 4 месяца по данным [Еманов и др., 2009] и системы тектонических поверхностных разрывов в районе г. Польшаево [Овсяченко и др., 2010]. Горизонтали рельефа проведены через 5 м. Жирными линиями обозначены разрывные нарушения земной поверхности; тонким пунктиром – разломы, кружками – эпицентры землетрясений

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОМЕХ (на примере данных сейсмической станции «Дивногорье» Воронежской региональной сети)

Р.А. Орлов¹, С.П. Пивоваров¹, Э.В. Калинина^{1,2}, И. А. Сизаск^{1,2}

¹ - ФИЦ ЕГС РАН, Обнинск Калужская обл.

² - Воронежский государственный университет

Рассмотрены результаты анализа волновых записей и амплитудно-частотных спектров помех от движения железнодорожных составов в районе сейсмической станции «Дивногорье». Определены амплитудные и временные параметры помех и их связь с типами поездов, их загрузкой, скоростью движения и другими параметрами (рис. 1).

Максимальные скорости смещения частиц грунта (темный цвет на СВАН-диаграмме) связаны с высокочастотными колебаниями в диапазоне от 1.0 до 20 Гц во время прохождения железнодорожного состава в непосредственной близости от сейсмической станции. Превышение помех над спокойным микросейсмическим шумом составляет от одного до двух порядков и зависит от типа поезда. Скорость смещения частиц грунта, вызванное движением товарного состава, на записи вертикального канала достигает 50 мкм/с, горизонтального - 75 мкм/с. При движении электрички скорость смещения на записи на вертикальном канале составляет 3 мкм/с, на N и E-каналах - 5 мкм/с, то есть в 15 раз меньше. Тип поезда можно определить также по спектру помех, в которых на частотах 2.2, 3.4, 5.6 Гц появляются локальные максимумы. Совместный анализ волновых записей и данных визуальных наблюдений позволили сделать следующие выводы:

длительность помех и в скорость смещения частиц грунта в волновом поле при движении железнодорожных составов зависят от типа состава, количества вагонов в составе, их загрузки и скорости движения; продолжительность записи помех, затрудняющих регистрацию местных сейсмических событий и взрывов, зависит от тех же факторов и составляет от 4 до 22 минут; сейсмическая станция регистрирует помехи от состава на расстоянии до 10 км; максимальная скорость колебаний частиц грунта при транспортных помехах, регистрируемая станцией «Дивногорье», может достигать 50-70 мкм/сек.

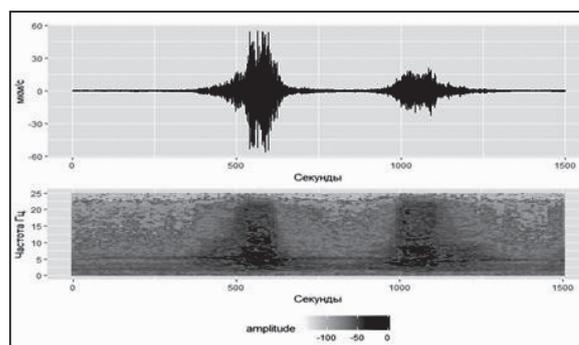


Рис. 1. Запись волнового поля помех от движения грузового и порожнего железнодорожного состава и СВАН-диаграмма амплитудно-частотного спектра. а - волновая запись транспортных помех, б – СВАН-диаграмма амплитудно-частотного спектра транспортных помех

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОД ЗОНЫ ИНТЕНСИВНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИМОРСКОГО РАЗЛОМА БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

А.А. Остапчук^{1,2}, Э.М. Горбунова¹, В.В. Ружич.³, А.В. Григорьева⁴, В.В. Ефремов²

¹ - Институт динамики геосфер РАН, Москва; ostapchuk@idg.chph.ras.ru

² - МФТИ (ГУ), Долгопрудный

³ - Институт земной коры СО РАН, Иркутск

⁴ - Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва

Избыточные напряжения, накопленные в областях структурной нарушенности, снимаются, как правило, в ходе межблокового проскальзывания вдоль существующих нарушений сплошности. Различные моды межблокового скольжения формируют непрерывный ряд, который включает асейсмический крип, события медленного скольжения, низкочастотные и очень низкочастотные землетрясения, нормальные землетрясения. Важную информацию об особенностях эволюции разлома и закономерностях реализации того или иного типа межблокового скольжения, может дать анализ механических и минералогических свойств пород центральных частей разломов.

В настоящей работе представлены результаты исследований образцов пород, извлеченных из зоны интенсивных деформаций Приморского разлома Байкальской рифтовой зоны. Проведен петрографический анализ шлифов отобранных образцов. Анализ микроструктуры шлифов показал, что интенсивные сдвиговые деформации локализуются в узкой зоне, которая отчетливо указывает на динамическое воздействие на минералы в процессе тектонического проскальзывания. Так, например, анализ шлифов зеркала скольжения показал, что порфиоровые вкрапленники полевого шпата, имеющие размер 0,2-2,5 мм и располагающиеся в основной массе неравномерно, сильно разбиты микротрещинами по спайности и имеют волнистое погасание.

Реологические особенности сдвигового нагружения отобранных образцов были исследованы на установке «слайдер»-модели. Был реализован широкий спектр режимов скольжения. Показано, что реализация определенного режима межблокового скольжения определяется не столько прочностью породы, сколько её структурой на мезоуровне. *Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-05-01271).*

ПРОЯВЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОСТИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕГИОНАЛЬНОГО РАЗЛОМА

Д.В. Павлов, В.И. Куликов, В.К. Марков, А.А. Остапчук, В.В. Седоченко

Институт динамики геосфер РАН, Москва; dpav123@mail.ru

В работе представлены результаты сейсмических и деформационных измерений, проведенных на региональном Стретенском разломе в подземной выработке шахты им. И.М. Губкина Комбината КМАруда (г. Губкин Белгородской обл.) на горизонте -125 м (глубина 300 м от свободной поверхности). Разлом сложной структуры, мощностью до 100 м, длиной несколько километров [Двойнин и др., 1985]. Учитывая большую мощность разлома, было принято решение проводить измерения на наиболее ослабленном участке внутри разломной зоны шириной около 5 м. Поперек этого участка, на стенке выработки, был установлен профиль датчиков скорости из пяти измерительных точек длиной около 20 м. Кроме того, на одной из тектонических трещин внутри этого участка был установлен деформометр, измерявший относительное смещение берегов трещины.

Первые же измерения дали интересный результат. При просвечивании разлома сейсмическими волнами от разных источников существенно разной интенсивности полученные оценки нормальной жесткости разлома (производная нормального напряжения, действующего на разлом по относительному нормальному перемещению его берегов) оказались также существенно различными. Заметим, что параметры исследуемого участка разломной зоны, измерительного профиля и сейсмических волн, использовавшихся для его просвечивания, были подобраны таким образом, что обработку результатов измерений можно было проводить в рамках квазистатического приближения [Кабыченко и др., 1996; Костюченко и др., 2002]. Интенсивности воздействия на исследуемый участок разлома в двух разных экспериментах (удар деревянной шпалой в стенку выработки и взрыв в камере шахты) различались на порядок (максимальное нормальное напряжение, действующее на исследуемый участок разлома, $\sigma_1 \sim 130$ и $\sigma_2 \sim 1300$ Па, соответственно). Полученные оценки нормальной жесткости исследуемого участка разлома оказались отличными также более, чем на порядок ($k_{n1} \sim 7.7$ и $k_{n2} \sim 0.4$ МПа/мм, соответственно). Кроме того, при регистрации взрыва деформометр зарегистрировал остаточную деформацию около 0.2 мкм.

Межблоковые деформации на напряженном контакте могут накапливаться при любой амплитуде динамического воздействия [Кочарян и др., 2005; Кочарян и др., 2006], и обусловлено это именно нелинейностью характеристики напряжение-деформация. Однако при многократных циклах нагрузка-разгрузка контакт как бы "привыкает" к уровню динамической нагрузки. Для того, чтобы начать процесс межблокового перемещения, надо

увеличить амплитуду воздействия - преодолеть порог фоновых колебаний. В данном случае удары шпалой соответствуют фоновому уровню динамических нагрузок в шахте, в то время как взрыв - сильное воздействие, способное "запустить" межблоковую подвижку. Работа выполнена при финансовой поддержке РФ (проект № 16-17-00095).

ЭВОЛЮЦИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В РАЙОНЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СКВАЖИНЫ Г-1 ПРИ ПОДГОТОВКЕ И РЕАЛИЗАЦИИ БЛИЗКОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО СОБЫТИЯ: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

И.А. Пантелеев¹, Е.В. Полтавцева², В.А. Гаврилов²

¹ - Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь; pia@icmm.ru

² - Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский

Ранее в работах авторов [Гаврилов, Пантелеев, Рябинин, 2014; Panteleev, Gavrilov, 2015; Гаврилов, Пантелеев, 2016] был предложен физический базис для объяснения закономерностей изменения геофизических параметров в районах ряда измерительных скважин (Камчатский геодинамический полигон) при подготовке и реализации относительно близких и сильных сейсмических событий. Настоящее исследование посвящено валидации предложенного базиса и направлено на разработку математической модели эволюции геофизических полей различной природы в районе измерительной скважины Г-1 и проведение численных расчетов с учетом конкретного геологического строения среды в районе этой скважины.

Разрабатываемая математическая модель имеет два пространственных масштаба, на первом (более крупном) масштабе рассматривается задача об изменении объемной деформации в хрупкой упругой геосреде, вызванном эволюцией шаровой неоднородности упругих свойств, являющейся прообразом очага сейсмического события. Моделью второго пространственного масштаба является модель эволюции механических, фильтрационных, концентрационных и электрических полей в районе измерительной скважины Г-1, вызванной изменением объемной деформации, вычисленным на первом масштабном уровне. Таким образом, решение, полученное на первом масштабном уровне, является управляющим воздействием для модели второго уровня. Согласно имеющимся исходным данным о геологическом строении среды в районе скважины Г-1 была разработана двухмерная структурная схема расчетной области. Геосреда в районе скважины Г-1 состоит из пяти горизонтальных слоев, имеющих различные физико-механические свойства. Под углом 9.2° в оси скважины располагается разлом Совхозный, пересекающий саму скважину в интервале глубин 1700-1800 м. Для случая невозмущенного состояния геосреды (асейсмичный режим) вычислена схема питания скважины Г-1. Основная миграция флюида к скважине осуществляется по разлому Совхозный (характерная скорость 12-15 м/сутки), в свою очередь наиболее интенсивный приток флюида к разлому осуществляется в слоях диорита, характерная скорость миграции флюида в которых составляет единицы метров в сутки. На основе решения диффузионной задачи получено распределение концентрации хлорида натрия во флюиде, заполняющем порово-трещинное пространство геосреды в районе скважины Г-1. Показано, что распределение концентрации хлорида натрия определяется стационарным фильтрационным полем питания скважины Г-1, а также установлено, что минерализация флюида на забое скважины определяется в основном минерализацией флюида с более глубоких горизонтов.

Установленные стационарные распределения и закономерности в асейсмичный период функционирования скважины Г-1 были использованы в качестве начальных условий при решении задачи второго масштабного уровня в случае эволюции шаровой неоднородности. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-2682.2017.5).

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА

Д.А. Пестов

ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва; dmitr-ey94@mail.ru

Гидроразрыв пласта является одним из широко применяемых способов увеличения продуктивности нефтяных и газовых месторождений. Процесс гидроразрыва подразумевает образование трещины в горной породе, за счет которой и увеличивается продуктивность скважины [Adachi, Siebrits, Peircec, Desroches, 2007]. Моделирование данного процесса позволяет определить параметры трещины при заданных параметрах закачки, что даёт возможность оценить влияние этого процесса на состояние окружающей породы. Кроме того, в случае известного поля напряжений можно предсказать направление роста трещины.

В данной работе, с использованием методов механики сплошной среды [Акулич, Звягин 2008; Ивашнев, Смир-

нов, 2003], построена, а также численно реализована модель роста трещины гидроразрыва пласта в следующих предположениях: 1. Присутствует утечка жидкости гидроразрыва в породу; 2. Жидкость гидроразрыва вязкая и слабосжимаемая; 3. Горная порода вокруг трещины считается линейно упругой; 4. Толщина трещины принимается много меньшей в сравнении с её длиной и шириной. С помощью данной модели исследуется зависимость основных характеристик трещины (таких, как длина и раскрытие) от свойств закачиваемой жидкости, окружающей породы, а также от параметров процесса закачки. Кроме того, в работе исследуется поведение трещины в случае неоднородного поля напряжений. Получены немонотонные зависимости длины трещины от скорости закачки жидкости гидроразрыва, а также от её вязкости.

РОЛЬ СЕЙСМОДЕФОРМАЦИЙ В ГИДРОТЕРМАЛЬНОМ РУДООБРАЗОВАНИИ

В.А. Петров

ИГЕМ РАН, Москва; vlad@igem.ru

Основная роль сейсмодиформаций в гидротермальном рудообразовании заключается в создании условий для пульсационного и фокусированного поступления потоков рудоносных растворов в сегменты растяжения разломно-трещинных структур, оптимально ориентированные в тектоническом поле напряжений в зоне рудоотложения. Рудообразующие флюидно-магматические системы в верхней сейсмогенной части земной коры формируются на фоне резких изменений напряженно-деформированного состояния геологической среды в течение сейсмических циклов, каждый из которых включает четыре стадии: досейсмическую, косейсмическую, постсейсмическую и межсейсмическую («сейсмического покоя») [Scholz, 1990]. Изменения в режиме миграции рудоносных флюидов происходят на протяжении всех стадий сейсмического цикла [Cox, 2005; Sibson, 2001]. Наряду с этим основная фаза поступления гидротермальных растворов в разрывные нарушения приходится на косейсмическую и постсейсмическую стадии разрядки напряжений, а отложение основного объема внутритрещинного минерального вещества происходит на межсейсмической стадии кратковременных малоамплитудных подвижек в благоприятных структурно-литологических и тектонофизических обстановках, а также физико-химических условиях. Наиболее ярко фазы активизации структурообразующих и гидротермальных процессов проявляются в рудоносных вулcano-тектонических структурах, являющихся наиболее активными концентраторами восходящих флюидопотоков [Петров, Ребецкий, Полуэктов, Бурмистров, 2015]. Взаимосвязь между параметрами поля напряжений-деформаций, каналами миграции флюидов, внутривпоровым флюидным давлением и свойствами флюидов обеспечивается клапанным (компрессия-декомпрессия) гидродинамическим механизмом разломной тектоники, действующим в течение сейсмического цикла [Nguyen, Cox, Harris, Powell, 1998; Cowie, 1998]. Этот механизм регулирует поступление кислородсодержащих поверхностных вод на глубокие горизонты разреза и их смешение с гидротермальными растворами в случае, если на косейсмической и постсейсмической стадиях возникла гидравлическая связь флюидопроводящих и флюидофокусирующих разломов с поверхностью [Петров, Андреева, Полуэктов, 2014]. При землетрясениях в процесс перестройки тектонического каркаса и гидродинамической обстановки вовлекается объем пород, превосходящий по размеру собственно источник.

Развитие флюидопроводящих структур может инициироваться «наведенной» сейсмичностью, когда источник неупругих тектонических деформаций находился на значительном удалении и в настоящее время его идентификация затруднена. Поэтому взаимосвязь между палеосейсмодиформациями и рудогенезом не всегда очевидна. Выявление стадийности развития рудовмещающих разрывов в контексте механизма сейсмодиформаций пород расширяет перспективы для оценки времени проявления и прогноза масштабности эндогенных рудообразующих процессов, а также поиска жильно-штокверковых гидротермальных месторождений, особенно в активизированных областях земной коры.

НЕКОТОРЫЕ МОМЕНТЫ РЕАКЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

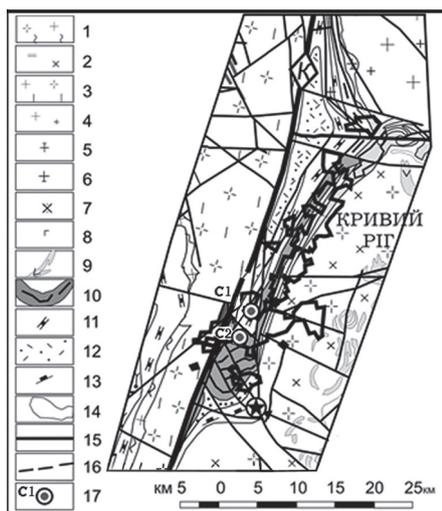
(на примере мониторинговых исследований в г. Кривой Рог, Украина)

П.И. Пигулевский

ДГЭ «Днепрогеофизика», ИГФ НАН Украины, Днепр; pigulev@ua.fm

Гидрогеодеформационные мониторинговые исследования в г. Кривой Рог осуществляет Днепропетровская геофизическая экспедиция (ДГЭ) «Днепрогеофизика» с декабря 2007 г. в скважине С1 глубиной 815 м и ноября 2012 г. в скважине С2 - 1500 м. Они расположены в Криворожской структурно-тектонической зоне Украинского щита

та (рис. 1) и заполнены трещинно-жильными водами кристаллического фундамента. Измерения выполняются в автоматическом режиме датчиками miniDiver-10 фирмы Schlumberger каждые 5 мин.



Накопленный огромный массив информации по гидрогеодеформационному режиму, проходящему в этих мониторинговых скважинах, показывает, что колебания уровня подземных вод в них различный (рис. 2). Установлен интересный факт, что скважина С1 работает в режиме сжатия-растяжения, при котором проявляются лунно-солнечные приливы, а скважина С2 – преимущественно на растяжение. Уровень воды в ней за четыре года опустился с 98,0 до 100,15 см. Аномалии на нижнем графике (рис. 2) коррелируют с атмосферным давлением, но имеют обратный знак.

Рис. 1. Фрагмент геологической карты строения Криворожской структуры: К (буква в ромбе) – Криворожско-Кременчугский глубинный разлом: 1-9, 13 – кристаллические породы рамы; 10-12 – железистые кварциты, сланцы, метапесчаники, метакогломераты, метаалеволиты Криворожской структуры; 14 – литологические границы; 15-16 разломы разных рангов, установленные по материалам бурения и геофизики; 17 – скважины гидрогеодеформационного мониторинга

Это связано с реакцией подземных вод на давление воздуха на поверхность земной коры. Как видно на рис. 1 эти скважины имеют разную структурно-тектоническую позицию. Скважина С1 расположена в той части структуры, где преобладают субмеридиональные системы разломов, а С2 – в южной части Криворожской структуры, где преобладают диагональные (северо-западные) и субширотные системы разломов (рис. 1).

В приведенном примере (рис. 2) видно, что общий характер изменения уровня подземных вод в скважинах С1 и С2 на данном отрезке времени находится в противофазе. Хотя при рассмотрении более длинного ряда мониторинговых наблюдений устанавливается четкий тренд в общем снижении уровня воды в скважине С2 и периодических разнопериодных колебаниях в скважине С1. При этом максимальные отметки уровня стояния подземных вод в С1 были отмечены в октябре 2011 г. (106,05 м) после известного катастрофического землетрясения в Японии (14 марта 2011 г.).

Выводы. Гидрогеодеформационный режим колебаний подземных вод, приуроченных к кристаллическим породам Украинского щита, зависит не столько от глубины скважины и уровня их стояния, сколько от их структурно-тектонической позиции.

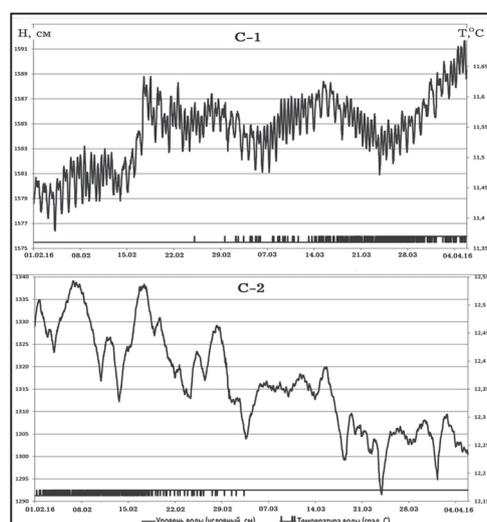


Рис. 2. Графики колебаний уровня подземных вод в скважинах С1 (вверху) и С2 (внизу) за период времени с 1 февраля по 6 апреля 2016 г. (при дискрете 30 мин)

ПРОЯВЛЕНИЕ ПРЕДШЕСТВУЮЩЕЙ СЕЙСМОАКТИВНОСТИ И ЗАТИШИЙ ДЛЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЕ

Е.И. Пономарёва

Институт земной коры СО РАН, Иркутск; Squirrel@crust.irk.ru

С помощью специально разработанного программного пакета, предназначенного для обработки каталогов тектонических землетрясений, проведен пространственно-временной анализ сейсмического процесса в Байкальской рифтовой зоне (БРЗ) [Левина, 2005]. Акцент сделан на подготовке локальных очагов отдельных землетрясений с $K \geq 12$ ($M \geq 4.4$). Представлены результаты анализа по 20 землетрясениям с различными энергетическими показателями, при подготовке которых реализуется классический сценарий сейсмического режима в виде предшествующей сейсмоактивизации и последующего затишья [Мячкин, Костров, Соболев, Шамина, 1975; Нерсесов, Пономарев, Тейтельбаум, 1976; Ружич, 1997]. Рассматриваемые площади эпицентров подбирались индивидуально для каждого землетрясения в зависимости от геометрии полей форшоков и афтершоков и варьировали от 900 до 18000 км². При этом обращалось внимание на различные местоположения эпицентров, анализируе-

мых главных событий по отношению к разломам и межвпадинным перемычкам. Учтены и различные модели подготовки потенциальных очагов землетрясений в отдельных составных частях Байкальской рифтовой зоны [Мячкин, Костров, Соболев, Шамина, 1975; Ружич, 1997; Соболев, 1993]. Построены графики и диаграммы, - демонстрирующие соотношение периодов подготовки к энергии и времени ожидаемого главного энергетического события. Полученная зависимость длительности интервала предшествующего сейсмического затишья с энергией главного события имеет вид уравнения: $y = 4.5645 \ln(x) - 12.556$, при значениях $R^2 = 0.71$.

По рассмотренным землетрясениям в БРЗ установлено, что с увеличением длительности предшествующих периодов активизации и затишья возростала вероятность возникновения энергетически более крупного события. Сходная зависимость проявилась и при выявлении связи длительности интервала времени предшествующей сейсмической активизации с энергией главного события. Для нее получено следующее уравнение: $y = 0.0114x + 10.484$, при значениях $R^2 = 0.497$. Как пример можно отметить, что подготовка значительного землетрясения с $K \geq 13$ ($M \geq 5$) и $K = -15$ ($M = 6,3$) составляет соответственно 200 и 350 суток.

При усовершенствованном способе среднесрочного прогнозирования параметров ожидаемого землетрясения в расчет принимаются совокупность показателей не только предшествующей сейсмической активизации, но и предшествующего сейсмического затишья. Таким образом, на основе совокупности полученной информации есть возможность с большей надежностью осуществлять среднесрочный прогноз землетрясений применительно к геодинамическим условиям БРЗ. Рассмотренный усовершенствованный способ среднесрочного прогноза землетрясений в БРЗ используется для слежения за режимом пространственно-временного распределения накопления текущих сейсмических событий с целью выявления параметров места, энергии и примерного времени ожидания ощутимых или более сильных сейсмических событий. Следует отметить, что во многом успех реализации среднесрочного прогноза умеренных по силе землетрясений связан со степенью представительности каталога землетрясений в диапазоне значений $K \geq 6-8$.

ПРИЗНАКИ МЕТАСТАБИЛЬНОСТИ КОРЫ ПРИ ПОДГОТОВКЕ К КАТАСТРОФИЧЕСКОМУ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЮ - ОСОБЕННОСТИ ПОЛЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Ю.Л. Ребецкий,
ИФЗ РАН, Москва

Множество различных экспериментов по деформированию образцов горных пород в условиях обжатия показывают, что характерный размер хрупких трещин соответствует характерному размеру вещественной неоднородности. В случае, когда образцы обладают высокой степенью однородности, их хрупкое разрушение происходит за счет формирования достаточно прямолинейной плоской трещины или сопряженной системы из двух трещин. При высоком уровне обжатия в таких образцах вообще не наблюдается видимых хрупких трещин, а достижение предельной нагрузки связано с пластическими внутрикристаллическими деформациями или межзерновыми сдвигами. Поскольку структурно-вещественная неоднородность всегда сопровождается неоднородностью напряженного состояния, то отсюда следует, что неоднородность напряженного состояния земной коры должна контролировать возможность формирования крупных землетрясений.

Другим результатом экспериментов по разрушению образцов горных пород является выявленная роль сил трения на поверхности хрупких сколов. Чем выше уровень всестороннего давления, тем менее эффективным становится механизм хрупкого разрушения для диссипации механической энергии. Поэтому важным элементом хрупкого разрушения в горном массиве является флюидное давление, возникающее в трещинно-поровом пространстве. Чем меньше трение на поверхности трещины сдвига, тем больше энергии, высвободившейся в результате смещения ее бортов, пойдет на разрушение материала в кончике трещины, а не рассеется в виде тепла вдоль поверхности трещины. Как результат трещины, развивающиеся в области с низким уровнем всестороннего давления, обладают большим потенциалом для роста своей длины и, следовательно, могут вырасти от макро- до мегаскопического уровня. Поскольку флюидное давление является ключевым фактором снижения давления трения на поверхности скола в глубине коры, то метаморфические преобразования вещества в разломных зонах, приводящие к появлению дополнительной свободной воды в трещинном пространстве пород [Ребецкий, Тектонические напряжения ..., 2007], должны рассматриваться как важный элемент возникновения неустойчивого состояния, приводящего к сейсмической катастрофе – крупному землетрясению.

Практически все представленные выше тезисы нашли свое подтверждение в результатах тектонофизических исследований областей подготовки катастрофических землетрясений, произошедших в 21 веке [Ребецкий, Маринин, Геол. и геофиз, 2006; Rebetsky, Tatevissian, BSGF, 2013; Rebetsky, Polets, Tectonophysics, 2016]. Эти исследования производились на основе метода катакластического анализа разрывных смещений, созданного в ИФЗ РАН, а исходными данными служили сейсмологические данные о механизмах очагов землетрясений, произошед-

шие до катастрофических землетрясений. Следует отметить, что все данные о напряженном состоянии земной коры в зонах крупнейших разломов (границы плит) были получены в масштабе усреднения 50-100 км, что характеризует их как средние для всего корового сейсмогенного слоя. Такой большой масштаб усреднения напряжений был обусловлен невысокой плотностью сейсмических событий, имеющих определения механизмов очагов землетрясений. В глобальном каталоге Геологической Службы США (Global CMT Project и NEIC), создаваемом по данным сейсмической сети IRIS, такая информация имеется только для землетрясений с $M > 4.5$. Результаты тектонофизического анализа напряженного состояния [Rebetsky et al., 2013], сформировавшегося перед землетрясениями Суматро-Андаманским $M = 9.1$ (2004 г), Симуширским $M = 8.7$ (2006 г), Чилийским – Мауле $M = 8.9$ (2010 г) показали, что основная часть очага этих землетрясений приходилась на области среднего и низкого уровня эффективного давления (тектоническое давление минус давление флюида). При этом в области окружения этих землетрясений наблюдался более высокий уровень эффективного давления. Важным результатом изучения природных напряжений областей этих сильных землетрясений было выявление участка высокого градиента напряжений, в котором, как правило, начиналось хрупкое разрушение. Наиболее очевидно это проявилось для Суматро-Андаманского землетрясения.

Все выше указанные теоретические, вытекающие из лабораторного эксперимента, и практические результаты изучения условий формирования сильных землетрясений позволяют сформулировать условия метастабильного состояния разломных зон. Прежде всего, дадим определение метастабильного состояния разломов. Будем под таким состоянием понимать определенный тип распределения напряжений вдоль разлома, в котором он может находиться неопределенно долго, но в результате именно наличие этой закономерности напряжений и определяющей возникновение здесь сильного землетрясения.

Таким образом, первым необходимым условием метастабильности участка разлома является неоднородность его напряженного состояния, проявляющаяся в наличии протяженной области пониженного эффективного давления. Будем это условие называть пространственным или региональным фактором метастабильности, так как размер этой области – размер очага будущего сильного землетрясения. Вторым условием метастабильности участка разлома является существование на границах или внутри области пониженного эффективного давления небольшой зоны высокого градиента напряжений. Это условие также важно для выделения данного участка разлома как наиболее опасного. В случаях большого усреднения напряжений, когда речь идет о реконструкции средне коровых напряжений, зону высокого градиента напряжений следует рассматривать область триггерного возникновения землетрясения. Будем это условие называть локальным фактором метастабильности.

Новые взгляды на влияние стресса на протекание метаморфических преобразований [Ребецкий, Геофиз. жур., 2007] позволяет предположить, что в таких зонах появляется свободная вода, резко снижающая силы трения на разломе. Можно также допустить, что градиент напряжений, который, по сути, является массовой силой, способствует подтоку в эту зону свободной воды. Если такая зона плохо выражена, то это означает, что указанные выше процессы также слабы и поэтому вероятность возникновения здесь условия да начала триггера для крупномасштабного хрупкого разрушения. В сильно выраженной зоне градиента эти процессы идут активно, и меньше времени потребуется природе для создания условий, когда малый триггер создаст крупное землетрясение. Катастрофическое Тохоку землетрясение 2011 г ($M = 9.0$) позволило понять более детальную закономерность поля тектонических напряжений, поскольку для Японии с 1998 года была создана высокоплотная региональная сеть сейсмических станций *f-net*. Данные этой сети дали возможность выполнить реконструкцию напряжений в масштабе усреднения 10-30 км, разделив весь сейсмогенный слой на несколько глубинных уровней (слои по 20 км мощности). В результате было установлено, что очаговая область до землетрясения Тохоку выглядела как область градиента напряжений вкрест разлома, разделяя кору на области повышенного (к востоку) и пониженного (к западу) уровней напряжений. Подобная особенность напряженного состояния в масштабе усреднения в 70-100 км будет выглядеть как область пониженного уровня напряжений. Логично предположить, что неоднородность напряженного состояния связана с неоднородностью, возникшей на границе контакта океанского и субконтинентального участков литосферных плит.

ИСТОЧНИК ТЕКТОНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ЛИТОСФЕРЫ – КОНВЕКЦИЯ В МАНТИИ ИЛИ ПРОЦЕССЫ В ЯДРЕ ЗЕМЛИ ?

Ю.Л. Ребецкий,

ИФЗ РАН, г. Москва, reb@ifz.ru

В геодинамике рассматриваются три основных энергетических источника напряжений в литосфере. Это энергия сил гравитации, тепловая энергия и кинетическая энергия вращающейся планеты. Первый источник обычно определяется как фактор, создающий основной вклад (гравитационные массовые силы) в вертикальные си-

лы тяжести. С этими массовыми силами связано литостатическое (вес вышележащих пород) и всестороннее давления, повышающиеся с глубиной, и определенный уровень девиаторных напряжений. Второй энергетический источник считается ответственным за мантийную конвекцию [Трубицын, Физика Земли, 2012], латеральные движения литосферных плит и плюм тектонику [Добрецов, Геология и геофизика, 2010]. Третий фактор, связанный с действием центробежных сил вращающейся Земли [Стовас, Изб. Тр., 1975], вносит небольшой вклад в силу тяжести и часто упоминается в исследованиях по геодинамике как источник влияния на особенности азимутального распределения планетарной трещиноватости [Планетарная трещиноватость, 1973; Ребецкий, Геод. и тектонофиз., 2016].

Сейсмические данные о внутреннем строении мантии, полученные в последние 10-15 лет [Lay et al., Science, 2006; van der Hils et al. Science, 2007; Murakami et al., Science, 2004; Oganov, Ono, Nature, 2004; Hirose, Rev. Geophys., 2006], показали, что нижняя мантия значимо неоднородна. В глубине нижней мантии наблюдается крупномасштабная зональность вещества, в которой наряду с областями стандартно мантийной скорости выделяются также области повышенной и пониженной скорости. Существует два крупных объема, именуемых LLSVP (большие провинции низкой сдвиговой скорости) под Африкой и в центре Тихого океана. Между ними расположились зоны повышенной скорости, в качестве материала которой предполагается постперовскит. Считается, что материал обеих этих областей на 2-3% плотнее нижнемантийных пород (перовскитоподобная модификация). Постперовскитовые зоны наиболее плотные из всех, имеют мощность около 200 км и рассматриваются как «кладбище» субдуцировавшихся океанических частей литосферных плит. Согласно устному сообщению В.П. Трубицына (семинар ОМТС в ИФЗ РАН 28 марта 2017 г) области LLSVP сейчас рассматривают как источник плюмов и в рамках новых его расчетов являются областями восходящей ветви конвекции. Каждая из LLSVP занимает до четверти окружности планеты и распространяется от ядра на 1/3 мощности нижней мантии. Время жизни всей этой структуры 750–1200 млн лет и возможно более. Подобный временной диапазон стабильности нижнемантийной структуры охватывает как минимум три важнейших этапа эволюции литосферных плит – формирование Родинии, Гондваны с Лавразией и Пангеи. В эти моменты времени происходили неоднократные раздвигания и содвигания литосферных плит с субдукционным поддвиговым океанических частей плит в мантию и созданием новой литосферы в рифтовых зонах.

Согласно работам В.П. Трубицына [2012] долгое существование области повышенной температуры в одном и том же месте заставляет континенты перемещаться в области пониженной температуры и постепенно формировать там участки повышения температуры мантии. Следуя этим результатам, континенты могли перемещаться только вне LLSVP, которые сами являются областями повышенной температуры мантии. Наиболее обширными такими областями являются полюса планеты, существенно меньшими зонами возможного нахождения континентов являются экваториальные области между Африканской и Тихоокеанской LLSVP. Однако Родиния (1.1-0.75 млрд лет назад) формировалась в экваториальной части Земли, захватывая более трети экватора, то есть как бы не замечала разогретых областей нижней мантии. 450 млн лет назад сближение Гондваны и Лавразии также происходило почти над Африканским LLSVP. И совсем непонятно почему Африка около 250 млн лет назад после распада Пангеи начала перемещаться к экватору, став практически над областью разогретой нижней мантии (LLSVP). Отсюда можно сделать предварительный вывод, что движения литосферных плит не связаны с температурным режимом в нижней мантии. Следовательно, источником сил этих движений может не являться нижнемантийная конвекция.

О том, что нижнемантийная конвекция может не существовать в том виде, как она рассчитана теоретиками, говорит и тот факт, что используемый в гравиметрии коэффициент динамического сжатия планеты, измеренный в шестидесятых годах прошлого века на основе прецессии орбиты спутников (1/305.51), оказался меньше, чем коэффициент сжатия геоида (1/298.26). В то время это катастрофическое различие объяснили тем, что реально поверхность Земли более сжата, чем геоид (так как раньше скорость ее вращения была выше), а полученное значение коэффициента динамического сжатия связано с быстрым уменьшением сплюснутости эллипсоидальных глубинных границ (поверхности верхней и нижней мантии, ядра). Но с развитием GPS наблюдений стали доступны данные о глобальных высотах поверхности Земли с той же точностью, что и спутниковые измерения геоида (0.5 м). В результате было установлено [Ребецкий, 2016], что усредненные в масштабе 100-200 км равнинные части континентов и океанов отличаются по форме от геоида и в среднем отвечают полученным ранее данным о величине коэффициента динамического сжатия Земли. Это говорит о том, что вещество в нижней мантии не перемешивается (нет конвекции) и поэтому форма Земли не подстроилась под сегодняшний потенциал силы тяжести (гравитационные силы и инерционные силы вращения).

Если выполнить анализ теоретических основ расчетов В.П. Трубицына термогравитационной конвекции в мантии, то выясняется, что критически важным их элементом является достаточно низкий уровень вязкости в нижней мантии (10^{20} - 10^{22} Па*сек). В тоже время сегодняшние данные говорят о том, что в мантии с глубиной возрастает разница между температурой и температурой плавления вещества: 1.12 в астеносфере, 1.5 и 1.62 у кровли и подошвы (над слоем D'') нижней мантии. Поскольку энергия активации в первом приближении изменяется пропорционально температуре плавления, то это означает достаточно большой рост в верхней и нижней мантии вязкости с глубиной (на 5-7 порядков даже в случае, если вслед за В.П. Трубицыным принять вязкость астеносферы

10^{17} Па). Это означает фактический запрет на конвекционное течение в нижней мантии для глубин более 1000-1500 км. Сделанный вывод о невозможности полномасштабной нижнеймантийной конвекции требует нахождения источников силы,двигающих литосферные плиты. В работе [Ребецкий, 2016] предложено в качестве таких сил рассматривать малые тангенциальные массовые силы, возникающие из-за несовпадения усредненной поверхностной формы литосферных плит и геоида. Показано, что таких сил вполне достаточно, чтобы обеспечить движения плит со скоростями в первые сантиметры – десятки сантиметров по верхней мантии с вязкостью 10^{20} Па.

В рамках предложенной концепции основным источником изменений потенциала силы тяжести предлагается рассматривать медленные движения твердого ядра внутри жидкого ядра, связанные с изменением момента инерции планеты. Такие изменения в ходе эволюции Земли происходят из-за мантийных преобразований вещества (формирование областей повышенной плотности?), субдугирования в мантию литосферных плит и их движения по поверхности планеты, а также действия инерционных сил, возникающих во вращающейся системе Земля – Луна.

ПРОГРАММА ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ПРУЖИННО–БЛОЧНЫХ УСТАНОВКАХ (СЛАЙДЕРАХ)

В.Ю. Рикман

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва; rickman@ihed.ras.ru

Эксперименты на слайдерах [Kocharyan, Novikov, 2016] могут протекать более суток, при этом записывается большой массив измеренной информации, который обрабатывать вручную, даже с помощью такого мощного визуализатора как PowerGraph [Программное обеспечение PowerGraph ..., 2009], достаточно сложно. Поэтому была разработана специальная программа для автоматической обработки данных экспериментов на пружинно – блочных установках. Основная трудность при разработке такой программы являлось ограничение на размер массивов, существующее в языках программирования. Для решения этой проблемы ввод и обработка данных в программе осуществлялась последовательно по блокам, а полученные результаты последовательно выводились в выходной файл. При этом методе используемые в программе массивы имели разумный размер равный 1000.

Начало слипа определялось при одновременном выполнении условий $ABS(DX) > GT$ и $DX/DT > 0$ и $DF/DT < 0$. Конец слипа определялся при одновременном выполнении условий $ABS(DX) < LT$ и $DX/DT \leq 0$ и $DF/DT > 0$, где X – перемещение образца, F – сила приложенная к образцу, T – время, GT и LT – параметры фильтрации. Параметры фильтрации задаются, чтобы исключить дребезг датчиков. Они подбираются опытным путем и могут зависеть от степени предварительного разряжения измеренных данных, параметров датчиков, условий проведения эксперимента.

В результате работы программы выявляются все слипы происшедшие во время эксперимента. В выходной файл для каждого слипа выводится время начала слипа, расстояние перемещения во время слипа, величина изменения силы за время слипа, степень падения силы при слипе и продолжительность слипа. Кроме этого выводится общее количество слипов, а так же максимальные, минимальные и средние значения вышеуказанных параметров слипов в эксперименте.

ВСПЛЕСКИ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЛИТОСФЕРЫ – СЕЙСМИЧЕСКИЕ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА

М.В. Родкин¹, А.В. Жариков², Е.Б. Лебедев³

¹ - ИТПЗ РАН, Москва

² - ИГЕМ РАН, Москва

Величина проницаемости - наиболее изменчивый и потому ключевой фактор в реакции геосреды на внешние и внутренние воздействия. Экспериментальные определения проницаемости образцов горных пород в зависимости от давления и температуры дают ее базовые значения и тенденцию изменения с глубиной. Оценки проницаемости средней и нижней коры, сделанные по скорости метаморфических процессов, оказываются на два-три порядка выше. Аналогично большие значения проницаемости следуют и из результатов опытно-фильтрационных работ, и из скорости распространения фронтов иницированной сейсмичности. Приводятся примеры экстремально быстрого пространственного перераспределения гипоцентров землетрясений, обычно связываемых с волнами (эпизодами) аномально высоких значений проницаемости, в частности, выявленных по результатам анализа режима сейсмичности в узкой пространственно-временной окрестности сильных землетрясений. Обсуждается возможный физический механизм развития всплесков проницаемости в связи с процессами метаморфизма и изменениями напряженного состояния. Для появления столь больших по величине аномалий

необходимо массовое развитие как микро-, так макротрещиноватости. На основании сопоставительного анализа экспериментальных данных и теоретической модели, предполагается, что эти процессы, могут быть инициированы фазовыми переходами и присутствием водного флюида. Аналогичные механизмы могут реализовываться на границах зон метаморфических превращений и фазовых переходов в литосфере, где могут возникать механически ослабленные горизонты высокой проницаемости.

ГЛУБИННЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В РАЗЛОМАХ ЗЕМНОЙ КОРЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

В.В. Ружич

Институт земной коры СО РАН, Иркутск; Ruzhich@crust.irk.ru

Рассмотрены и проанализированы геологические и сейсмогеологические сведения о строении зон сейсмогенерирующих разломов на земной поверхности и в пределах земной коры Центральной Азии, где возникновение большинства очагов современных сильных землетрясений с $M = 6.0-8.5$ фиксируется сейсмологами в интервале глубин от 5-10 до 25-30 км. При анализе глубинных условий подготовки землетрясений учитывались сведения российских и зарубежных специалистов, полученные при физическом моделировании отдельных деталей механизмов трения во внутренних участках зон сейсмоактивных разломов при возникновении масштабных сейсмогенных подвижек. Применение разрабатываемого палеосейсмогеологического подхода, позволили осуществлять визуальное геолого-геофизическое изучение эксгумированных сегментов зон разломов с сохранившимися признаками глубинных косейсмических разрывов палеоземлетрясений, возникавших в далеком геологическом прошлом [Ружич, 1992; 1997]. В результате собраны материалы геолого-структурного обследования эксгумированного сегмента зоны Приморского разлома на западном берегу Байкала (район устья р. Бугульдейки), где была выявлена и изучена серия древних косейсмических разрывных нарушений. Их распознавание проводилось по зеркалам скольжения [Соболев, Веттегрен, Ружич и др., 2015], псевдотахилитам [Rice, 2006] и набору других петрофизических признаков, связанных с трибохимическим преобразованием минералов горных пород в условиях стресс-метаморфизма. Получены следующие сведения: глубина денудационного среза земной коры в указанном месте, произошедшая за сотни млн лет составила ≥ 10 км; оценены температуры и давления, при которых возникали условия палеосейсмогенных смещений, по изотопным характеристикам турмалиновой минерализации в залеченной трещине удалось оценить возраст зеркала косейсмической подвижки, составивший - 719 и 740 млн. Анализ сведений приводит к выводу о том, что выявляемые сложные сочетания петрохимических условий механохимического преобразования горных пород существенным образом влияли на процессы трения и сдвигового сопротивления в глубинных сегментах зон разломов и, соответственно, на режимы подготовки и генерации сейсмических колебаний в очагах готовящихся сильных землетрясений. На основе совместного анализа многочисленных накопленных геолого-геофизических сведений и экспериментальных данных, например в работах [Кочарян, Остапчук, Павлов и др., 2015; Кочарян, 2016] и др. высказываются представления о том, что зарождение большинства очагов сильных землетрясений происходило преимущественно в местах жестких контактных взаимодействий крупных неровностей (asperity) в зонах разломов, а также в разломных узлах и перемычках между разрывными нарушениями при их слияниях в магистральные зоны, что согласуется с известной кинетической концепцией прочности твердых тел С.Н. Журкова [Журков, Куксенко, Петров, 1977]. Предполагается, что при дальнейшем детальном изучении эксгумированных сегментов разломов в рамках палеосейсмогеологического подхода получаемая геолого-геофизическая информация может существенно дополнить сведения, полученные методами физического и численного моделирования.

Применение мультидисциплинарного изучения несомненно будет способствовать созданию более расширенных представлений о глубинном устройстве и механохимических процессах подготовки очагов катастрофических и разрушительных землетрясений. Новые сведения о геологических условиях возникновения косейсмических разрывов будут полезны для создания геомеханических моделей очагов землетрясений и новых перспективных способов более эффективного снижения инженерно-сейсмического риска от сейсмических катастроф.

О ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

В.В. Ружич, Е.Е. Левина

Институт земной коры СО РАН, Иркутск; Ruzhich@crust.irk.ru

Согласно закону повторяемости в сравнении с многочисленными слабыми и умеренными сейсмическими толчками число катастрофических и разрушительных землетрясений с $M \geq 7,5-8,5$ очень невелико. Следовательно, последние можно рассматривать как следствие редкого сочетания геодинамических факторов, способствующих их возникновению. В частности, о редкости крупных сейсмических катастроф, происходящих в пределах конкретных зон глубинных сейсмогенерирующих разломов, можно судить по большой продолжительности слабоактивных периодов между сильнейшими событиями. Например, на территории Монголии в зонах Долиноозерского и Северохангайского разломов они исчисляются многими сотнями – первыми тысячами лет. В работах, например, в [Ружич, 1997] уже рассматривались оптимальные РТ-условия, способствующие возникновению сильных и катастрофических землетрясений, которые были приурочены к сейсмофокальному горизонту, залегающему на глубинах от 5-10 до 25–30 км в земной коре Центральной Азии. При восстановлении по известным геохимическим критериям термобарометрических условий в пределах этого сейсмофокального горизонта установлено, что именно многовариантные механохимические преобразования горных пород в зонах разломов влияют на режимы фрикционного трения и вариации параметров сдвигового сопротивления. Однако еще остаются малоизученными причины внезапного снижения сдвигового сопротивления и одновременного перехода к высокоскоростному сейсмогенному скольжению в протяженных глубинных разрывах. При этом трудно предполагать, что подобные переходы к ускоренным подвижкам могут возникать синхронно на больших участках разломов, если исходить из распространенных геологических представлений о замедленности процессов трибохимических преобразований горных пород. В данном сообщении авторами предлагается другое, более приемлемое объяснение природы подобного скачкообразного перехода с привлечением известной кинетической концепции прочности твердых тел С.Н. Журкова [Журков, Куксенко, Петров и др., 1977]. В соответствии с ней, спонтанное возникновение крупных подвижек в локализованных сегментах залеченных длительно существующих разломов возможно при переходе с низшего иерархического уровня на более высокий, то есть при слиянии в лавинно-неустойчивом режиме крупных разрывов в еще более протяженные. Подобный механизм может быть также дополнен представлениями о внутриразломных фрикционных процессах проявления подобных переходов при масштабных разрушениях горных пород в пределах очень крупных неровностей, перемычек между окончаниями разрывных нарушений более низкого иерархического ранга, а также в районах узловых пересечений и разветвлений разломов.

Вместе со сказанным имеется еще одна веская причина возникновения спонтанного крупномасштабного сейсмодинамического разрушения в многоуровневой блочной структуре земной коры, которая может быть объяснена проявлением модулирующего влияния внешних факторов космогенной природы, например, таких как приливные силы, вариации скоростей ротационного и орбитального вращения Земли в Солнечной системе и другие. Подобные регулярно действующие космогенные факторы через механизмы триггерного воздействия также способны инициировать периодические синхронные сейсмогенные подвижки в протяженных участках разломов, находящихся в состоянии фрикционной неустойчивости. Масштабным откликом в таком случае могут быть проявления короткопериодной регулярности в сейсмическом режиме как для всей совокупности количества землетрясений, так и в суммарном выделении сейсмической энергии [Левин, Сасорова, 2012]. Эффект приливного воздействия на верхние оболочки Земли распространяется до глубин порядка 70 км в средних широтах, где величина вариаций плотности свободной энергии, сообщаемой от приливов земной коры, достигает максимума. Согласно расчетам, приведенным в работе [Sun, 1992], мощность приливов в этих широтах на три порядка превосходит суммарную мощность произошедших землетрясений. Следовательно, космогенные факторы через триггерные механизмы способны модулировать возникновение крупномасштабных очагов землетрясений именно в тех глубинных сегментах зон разломов, где в асейсмические периоды оказалось подготовлено большое число трибологических неустойчивостей

ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ ИСТОЧНИКОВ ИНФРАЗВУКОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПО СПЕКТРУ КОЛЕБАНИЙ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Ю.С. Рыбнов, А.А. Спивак, В.А. Харламов

Институт динамики геосфер РАН, Москва; rybnov.y@mail.ru

Источники мощных возмущений в атмосфере приводят к возникновению и распространению инфразвуковых волн (ИВ). Под ИВ подразумевается низкочастотная часть акустического спектра с частотами меньше 16 Гц, но больше предельной акустической частоты равной $\approx 0,0032$ Гц. Среди этих источников: извержения вулканов, цунами, ураганы, грозы, крупные метеороиды и мощные взрывы. Распространяющиеся в атмосфере ИВ надежно регистрируются на расстояниях в несколько тысяч километров. По волновой форме зарегистрированного сигнала можно оценить энергию источника.

В настоящее время энергию источника инфразвуковых возмущений в атмосфере оценивают как по амплитуде зарегистрированного сигнала, так и по характерной частоте в его спектре f_{max} , превалирующей над другими. На

основании анализа волновых форм инфразвуковых сигналов от наземных и воздушных взрывов были разработаны функциональные зависимости, позволяющие оценить энергию источника как по амплитуде сигнала, так и по характерной частоте. Функциональные зависимости получены для широкого диапазона мощностей источников, эпицентральных расстояний и азимутов из источника на пункт регистрации, а также моделей атмосферы для различных сезонов года. Сигналы регистрировались микробарометрами с полосой пропускания $0,01 \pm 0,3$ Гц на эпицентральных расстояниях от 500 до 5000 км. Однако достаточно мощные источники возбуждают в атмосфере колебания с частотами ниже 0,01 Гц. На волновых формах таких сигналов видны характерные низкочастотные вступления с периодами $\approx 2 \div 4$ минуты ($\approx 0,008 \pm 0,004$ Гц). Это вызвано тем, что в реальной атмосфере волна от мощного источника «распадается» на группы волн (так называемые нормальные волны), распространяющихся самостоятельно со своей скоростью. Так сигнал от извержения Сент-Хеленса был зарегистрирован на расстоянии ≈ 8000 км в восточном направлении с $f_{\text{хар}} \approx 0,0022$ Гц. Оценка энергии источника по зависимостям имеет порядок $8 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^5$ кт, что значительно превышает реальную энергию извержения равную $1 \cdot 10^4 - 3,6 \cdot 10^4$ кт.

В рамках данной работы было проанализировано 42 инфразвуковых сигнала зарегистрированных в полосе частот 0,003-0,3 Гц от взрывов в атмосфере на различных эпицентральных расстояниях как в восточном направлении от места взрыва, так и в южном. Получены новые функциональные зависимости энергии источника от характерной частоты в спектре сигнала. Получено распределение отношения спектральной энергии в узкой полосе частот к полной энергии по всему спектру, показано, что оно сохраняет свою форму для источников с разной энергией. Данное обстоятельство позволило разработать методику оценки энергии источника с характерной частотой менее 0,01 Гц. Предложено использовать полученную интегральную зависимость для оценки энергии источника $E_0 = (0,4/\omega)^3$. Разработанная методика тестировалась по базе данных. Для проверки использовались данные по волновым формам и спектрам от взрывов мощностью от 330 до 2400 кт на расстояниях 1000-5000 км. Получено хорошее совпадение оценок с реальной энергией источника.

ОСОБЕННОСТИ МАГНИТОВАРИАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ГФО «МИХНЕВО»

С.А. Рябова

Институт динамики геосфер РАН, Москва; riabovasa@mail.ru

Вариации электромагнитного поля Земли содержат информацию об электропроводности геологической среды, внутриземных и ионосферных (магнитосферных) электрических и магнитных источниках. Изучение вариаций приземного электромагнитного поля представляет значительный интерес. Это связано с тем, что передаточные магнитовариационные параметры электромагнитного поля содержат информацию о геодинемических процессах. В качестве исходных данных при анализе использовались результаты синхронных наблюдений за геомагнитными вариациями и режимом подземных вод на среднеширотной геофизической обсерватории "Михнево" ИДГ РАН ($54,96^\circ\text{N}$; $37,77^\circ\text{E}$) и геомагнитными вариациями на геофизической обсерватории «Борок» ИФЗ РАН ($58,03^\circ\text{N}$, $38,97^\circ\text{E}$), полученными за период 2010-2013 гг.

Геофизическая обсерватория "Михнево" (ГФО МНВ) расположена в 85 км к югу от города Москвы [Адушкин, Овчинников, Санина, Ризниченко, 2016]. Регистрация на ГФО МНВ локальных геомагнитных вариаций выполняется с помощью трехкомпонентного феррозондового магнитометра LEMI-018. Обсерватория "Борок" (ГО ВОХ) расположена в поселке Борок Некоузского района Ярославской обл. Расстояние между ГФО МНВ и ГО ВОХ составляет примерно 270 км. Измерения геомагнитного поля на ГО ВОХ выполняются с помощью трехкомпонентного магнитометра (производство GEOMAG) с диапазоном измерений ± 70000 нТл и полосой пропускания 0-1 Гц. В качестве регистратора используется система сбора данных ENO II (производство GEOMAG), частота дискретизации выходного сигнала составляет 1 минуту. Измерения вариаций уровня подземных вод выполняются с помощью стандартных электроуровнемеров и прецизионных датчиков уровня LMP308i (производство Германия) с дискретностью 1 с и точностью измерений 0,1 мм. В качестве исходных данных были рассмотрены ряды среднесуточных значений уровня верхнего безнапорного водоносного горизонта, приуроченного к лопасненской толще каширских отложений [Горбунова, 2006].

Для оценки магнитовариационных параметров в настоящей работе использовался метод Ларсена [Larsen, Maskie, Manzella, 1996], который позволяет подавлять шумы различных типов. В поведении магнитовариационных параметров (магнитного типпера и магнитного тензора) наблюдаются годовые вариации. Наряду с годовой периодичностью выделяются периодичности магнитного типпера с полугодовым периодом и периодом 60 сут. На основе данных инструментальных наблюдений за локальными длиннопериодными геомагнитными вариациями и уровнем подземных вод безнапорного водоносного горизонта на ГФО "Михнево" установлена и статистически обоснована значимая корреляция между локальными вариациями магнитного типпера на поверхности Земли и изменениями местного гидрогеологического режима. Установлена линейная зависимость между амплитудой магнитного типпера и уровнем подземных вод в открытой скважине.

ЭВОЛЮЦИЯ ТРЕЩИН ПРИ СДВИГОВОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА УСТАНОВКЕ СЛАЙДЕР-МОДЕЛИ

Н.В. Салтыков, А.А. Остапчук

Институт динамики геосфер РАН, Москва

Общепризнанным в научном сообществе является тот факт, что избыточные тектонические напряжения, накопленные в областях структурной нарушенности земной коры, высвобождаются не в результате образования и распространения новых трещин, а в процессе проскальзывания по уже существующим нарушениям сплошности. Доказано существование широкого спектра режимов скольжения по разломам, который включает в себя не только крип и нормальные землетрясения, но также и переходные режимы – события медленного скольжения, низкочастотные и очень низкочастотные землетрясения. Модели зарождения и эволюции различных режимов скольжения могут быть развиты на основе простых лабораторных экспериментов, в которых исследуются закономерности сдвигового деформирования трещины, пространство между берегами которой заполнено слоем гранулированного материала.

В настоящей работе исследовались закономерности изменения параметров модельной трещины при различных режимах скольжения. Эксперименты были выполнены в постановке классической слайдер-модели, в которой блок под действием приложенного нормального и сдвигового усилий движется вдоль поверхности раздела. В данной постановке экспериментов упругая энергия исследуемого объекта аккумулировалась в пружинном элементе, а закономерности её высвобождения определялись закономерностями фрикционного взаимодействия берегов модельной трещины. В ходе работы был смоделирован полный спектр режимов скольжения. Постепенное изменение свойств материала-заполнителя трещины (содержание глинистых компонент, вязкость увлажняющего флюида) и изменение уровня нормальных напряжений позволили реализовать плавную трансформацию режима скольжения. В каждой из таких серий был реализован постепенный переход от стабильного скольжения к прерывистому.

Проведенные эксперименты позволили выявить новые важные закономерности процесса эволюции разломов. С помощью метода «асимптотических координат» показано, что все режимы имеют общую закономерность изменения параметров на предсейсмической стадии цикла и могут быть описаны в рамках единого формализма. Стоит отметить, что различные серии трансформации характеризуются функциональными зависимостями, имеющими общий вид и отличающимися только нормировочными коэффициентами. Данный результат свидетельствует в пользу мнения о том, что быстрые и медленные события являются физически одинаковыми процессами. Показано, что параметром, контролирующим реализацию того или иного режима скольжения, является сдвиговая жесткость трещины. Выявленное соответствие между жесткостью разлома на стадии нагрузки k_0 и скоростью снижения сопротивления сдвигу в процессе относительного смещения берегов k_2 делает актуальным использование величины сдвиговой жесткости при построении геомеханических моделей разломов, а также для оценки интенсивности готовящихся сейсмических событий, приуроченных к локальному участку разлома. *Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-05-01271).*

ПРИЛИВНЫЕ ЭФФЕКТЫ В СЕЙСМИЧЕСКИХ ШУМАХ В ШИРОКОЙ ПОЛОСЕ ЧАСТОТ

В.А. Салтыков¹, А.С. Черепанцев²

¹- ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Камчатский филиал, Петропавловск-Камчатский; salt@emsd.ru

²- Южный федеральный университет, Таганрог

В течение 30 лет на Камчатке ведутся исследования приливных эффектов в высокочастотных сейсмических шумах (ВСШ). Для регистрации используется узкополосная аппаратура ($f = 30$ Гц). Недостатком этих исследований ВСШ является ограниченность частотного диапазона регистрируемого сигнала. При этом неизбежно возникает вопрос: «Будут ли приливные эффекты, выявленные в ВСШ на частоте $f = 30$ Гц, проявляться и в других частотных диапазонах?». Для ответа на этот вопрос был использован широкополосный сейсмометр ASA-3 конструкции А.С. Черепанцева, обладающий чувствительностью $50 \text{ Вc}^2/\text{м}$ в диапазоне частот 5–400 Гц. Регистрация была организована на сейсмостанции «Начики», на том же постаменте, где установлена узкополосная аппаратура ВСШ. Это обеспечило возможность для сравнения результатов, полученных различными типами приборов, с акцентом на сопоставление различных частотных диапазонов.

Отмечены следующие особенности регистрируемого сигнала: 1. Спектр сигнала представляет собой набор компонент со стабильным соотношением их спектральных плотностей. 2. Частоты, соответствующие максимумам спектра, устойчивы во времени. 3. Существуют частоты, для которых спектральная плотность всегда превышает уровень собственных шумов аппаратуры.

Для дальнейшего анализа были сформированы временные ряды значений спектральных плотностей сейсмического шума на 12 частотах, соответствующих максимумам спектра в диапазоне 68–319 Гц. Рассматриваются фазовые сдвиги $\Delta\varphi$ между вариациями ВСШ и приливами. Обнаружено, что: 1). Временной ход $\Delta\varphi$ для различных частотных компонент ВСШ соответствует среднему временному ходу. В этом случае осреднение позволяет получить оценки временного хода $\Delta\varphi$ с большей точностью и допускает использование отклика не только на мощные приливные волны типа O_1 , но и на существенно более слабые – Q_1 . 2). Временной ход среднего $\Delta\varphi$ для двух приливных волн O_1 и Q_1 также имеет совпадающие тенденции. Проведение по единой методике обработки данных регистрации ВСШ различными типами аппаратуры – узкополосной и широкополосной, позволило провести сравнение полученных результатов. Приведен временной ход среднего $\Delta\varphi$ для приливной волны O_1 по данным широкополосной регистрации и аналогичные данные узкополосной регистрации. Отмечено их соответствие. Обращено внимание на стабилизацию фазы в течение 5 недель в феврале-марте 2014 г. и последовавшее затем резкое изменение фазы на $\approx\pi$. Такое поведение фазы наблюдается при подготовке и реализации сильного землетрясения. В данном случае речь идет о землетрясении 10.03.2014 г. $M_L = 5.0$, произошедшем на эпицентральной расстоянии 120 км от станции «Начики».

На основании проведенного сравнения делается важный методологический вывод: частота $f = 30$ Гц, на которую настроена узкополосная аппаратура ВСШ, не является уникальной с точки зрения обнаружения приливной модуляции и мониторинга ВСШ по предлагаемой методике. Аналогичные результаты могут быть получены для ВСШ и на других частотах при использовании аппаратуры, позволяющей обеспечить необходимую чувствительность.

АНАЛИЗ ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНЫХ УСЛОВИЙ РАЙОНА МАРИУПОЛЬСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

И.А. Санина, Г.Н. Иванченко, Э.М. Горбунова

Институт динамики геосфер РАН, Москва; irina@idg.chph.ras.ru

Гипоцентр землетрясения, произошедшего 07.08.2016 г. севернее г. Мариуполь с магнитудой 4.8, приурочен к дизъюнктивного узлу, представленному пересечением разнонаправленных и разнопорядковых глубинных разрывных нарушений с протяженной субширотной системой взбросов, которая является структурообразующей границей раздела между относительно стабильным Приазовским блоком Украинского щита и наложенной Причерноморской впадиной, испытывающей опускание со скоростью 0,5–1,1 мм/год. Субмеридиональный сброс, прослеженный в фундаменте на уровне подошвы плитного комплекса, продолжает свое развитие в пределах Приазовского мегаблока, сохраняя те же элементы залегания. Тектонически ослабленная область пересечения разломов осложнена внедрением интрузивного массива на уровне кристаллического фундамента.

Вдоль субширотной системы взбросов юго-западнее очага Мариупольского землетрясения в 2006 г. было зарегистрировано Бердянское землетрясение с $M 3.5$. Эпицентр землетрясения 1990 г. ($M 4.2$), расположенный в акватории Азовского моря, приурочен к месту пересечения Главного Азовского разлома с вышеописанным субмеридиональным сбросом. Северо-восточнее очага Мариупольского землетрясения расположен эпицентр землетрясения 1940 г. ($M 3.5$), который локализован в пределах субщелочной интрузии, ограниченной субмеридиональным разломом. Краткий обзор исторических землетрясений, наиболее близко расположенных к очагу произошедшего Мариупольского землетрясения в 2016 г., совместно с анализом геолого-структурных условий позволяет сделать вывод о сейсмогенности структур рассматриваемой территории. Прослеженный ряд афтершоков на протяжении 5 дней после основного Мариупольского события по данным стационарных сейсмических групп (на основе кросскорреляции волновых форм [Китов, Санина, Сергеев и др., 2017]), указывает на постепенную релаксацию напряжений в пределах сложнопостроенных разнопорядковых геологических структур. Взбросово-сдвиговый механизм очага основного толчка Мариупольского землетрясения согласуется с существующим полем напряжений, характеризующимся субмеридиональным сжатием.

Первые афтершоки локализованы в пределах тектонического узла вдоль структурообразующей зоны. Последующие афтершоки приурочены к субмеридиональным и СЗ-ЮВ разломам, сопутствующим основной зоне, на участках их пересечения с границами щелочной интрузии. Ряд наиболее сильных афтершоков и основное событие прослежены вдоль субмеридионального разрывного нарушения, частично освоенного долиной реки Кальчик. Мариупольское землетрясение, сопровождаемое афтершоками, локализовано в сейсмоактивной области, в пределах которой отмечается высокая техногенная нагрузка на геологическую среду. Интенсивное антропогенное воздействие может рассматриваться в качестве триггерного механизма активизации сейсмогенных структур. В данном регионе авторами обозначены участки возможного возникновения техногенно-тектонических землетрясений на основе комплексного анализа геолого-структурных условий, сейсмичности и техногенной нагрузки. Аналогичный подход был использован при определении генезиса очага Полтавского землетрясения [Адушкин, Санина, Габсатарова, 2016] и отнесение его к типу техногенно-тектонических событий. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-00095).

ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ЭНДОГЕННЫХ РУДОГЕНЕРИРУЮЩИХ-РУДООБРАЗУЮЩИХ СИСТЕМАХ НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА

Ю.Г. Сафонов

ИГЕМ РАН, Москва; Safonov@igem.ru

Триггерные эффекты развития флюидно-магматических и флюидных (гидротермальных, метаморфогенных) систем, конечным продуктом развития которых являются месторождения и рудные поля, узлы обычно рассматриваются только применительно к рудообразующим процессам – условиям раскристаллизации рудоносных растворов, отложению рудообразующих компонентов. Факторы, явления, приводящие к зарождению, развитию систем остаются недостаточно определенными. Накопленное знание по геологической позиции, строению, составу, генезису эндогенных месторождений золота указывают на зависимости эндогенного рудообразования от различных режимов геодинамического развития геосфер. В тоже время золоторудные месторождения иллюстрируют возможности использования металлогенических данных как индикаторов проявления определенных глубинных геодинамических процессов.

Условия зарождения наиболее продуктивных золотоносных рудообразующих систем были неодинаковы в различные металлогенические эпохи, что увязывается с общей эволюцией геодинамических и, соответственно, металлогенических процессов развития в истории земной коры. В позднеархейскую и раннепротерозойские металлогенические эпохи, проявившиеся в Каапваальском кратоне, блоке Ийлгарн (Австралия), на Канадском, Индийском и Бразильском щитах, контрастно проявился контроль золоторудных месторождений региональными разломами, масштабными зонами скалывания, зеленокаменными поясами и локальными ареалами развития долеритового и субщелочного гранитоидного магматизма. Обширная информация показывает наиболее контрастное выражение вероятных парагенетических связей золоторудной минерализации с лампрофировым-долеритовым дайковым магматизмом, имеющим глубинные корни. Примечательны факты нахождения здесь скрытых гранитных батолитов и пегматитовых тел. Позднеархейская золоторудная минерализация вызывает особый интерес в связи с уникальным бассейном Витватерсранд.

В настоящее время наибольшее распространение в мире имеют представления о принадлежности его золота (≥ 80 тыс. т) к палеороссыпям, к продуктам эрозии среднеархейских (~ 3,2 млрд лет) золото-кварцевых месторождений. Последние геохронологические исследования зарубежными специалистами «галечных» пиритов Re-Os методами показали, что они имеют возраст ~ 3 млрд лет, как и гранитоиды основания бассейна, при возрасте метатерригенных пород и вулканитов в интервале 3-2,5 млрд лет.

Проведенные нами исследования наряду с опубликованными данными указывают на конседиментационно-гидротермальный генезис уран-золотоносных рифов Витватерсранда. Анализ соотношений золота, кварца, урана, пирита в месторождениях различных золотоносных провинций позволяет предполагать, что уникальный бассейн Витватерсранд сформировался в надплюмовом куполе, где проявились батолитовая гранитизация, компенсационное прогибание и генерация золотоносных (\pm Cr, Co, Os-Ir, U, Fe, S) флюидов в магматическом очаге, связанном с мантийным плюмом. В очаговой зоне развивались процессы дифференциации щелочных ультраосновных магм с образованием расплавов кремнезема и высокоплотных металлоносных флюидов (А.А. Маракушев, Н.А. Шило). При этом поступление последних в бассейн связывается с мощными периодическими эксплозиями, выносящими огромные массы кремнезема. Триггерные явления при дифференциации магматического протолита, по-видимому, были обусловлены повышенными концентрациями урана. В.И. Вернадский отнес радиогенное тепло к одному из важнейших факторов в развитии процессов минералообразования. Это положение в наибольшей степени отражено в сонахождении Au-U концентраций в разновозрастных комплексных месторождениях, а также в рудных полях и районах с би (Au-U) – U полиметальной (Cu-Au-U и др.) специализацией. Триггерными явлениями, вероятно, служили также процессы радиоактивного излучения (U, Th, K и др.), воздействующие на физическое состояние минеральных компонентов и тем самым на основные параметрические характеристики (P, T и др.), газонасыщенность и другие составляющие рудогенерирующих флюидно-магматических и флюидных систем, продуктами развития которых стали специализированные рудообразующие подсистемы или автономные системы. Естественны связи «радиогенных процессов» с другими факторами развития золотоносных систем - с тектоническими структурами и условиями их образования, соотношениями с магматизмом различных формаций, флюидно-динамическими обстановками и др.

Информация по глубинным рудникам (1-3,5 км), относящимся, в основном, к золоторудным месторождениям, позволяет рассматривать их как естественные экспериментальные площадки по исследованию напряженно-деформированных горных массивов.

СОВРЕМЕННЫЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ДВИЖЕНИЯ В РАЙОНАХ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ ОЧАГОВ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

А.Д. Сашурин, А.А. Панжин

Институт горного дела Уральского отделения РАН, Екатеринбург

В практике недропользования, включающей деятельность минерально-сырьевого комплекса по масштабной добыче, переработке и транспортировке полезных ископаемых, создание и эксплуатацию сооружений, зданий и коммуникаций на земной поверхности и в подземных условиях, нередко наблюдаются катастрофические геомеханические процессы – природно-техногенные землетрясения, не находящие объяснения с позиций установившихся представлений о формировании исходного и вторичного напряженно-деформированных состояний (НДС) массива горных пород.

Одним из подобных событий явилось нарушение грузовой железнодорожной станции, находящейся в области влияния подземной разработки Высокогорского железорудного месторождения шахтой «Магнетитовой». Наблюдательная станция, оборудованная на земной поверхности для мониторинга современных геодинамических движений, в течение нескольких лет фиксировала встречное движение соседних крупных структурных блоков. Процесс деформирования массива горных пород, фиксируемый наблюдательной станцией, завершился 01.10.2009 года подвижкой блоков с сейсмическим событием магнитудой 2,3 балла с оседанием земной поверхности до 1,3 м и деформацией рельсовых путей. Второй случай связан с развитием процесса сдвигания над изолированной Южной залежью Северопесчанского месторождения, кровля которого залегала на глубине 400 м. На начальной стадии отработки залежи при отработанной площади размером около 50×50 м на земной поверхности образовалась классическая полноценная мульда сдвигания с зонами обрушения, террас, трещин разрыва и плавных деформаций. В соответствии с классическими методами прогнозирования, процесс сдвигания должен был происходить без образования зоны обрушения лишь при отработке всей залежи, простирающейся на 250 м. Наблюдательная станция, оборудованная в районе залежи, фиксировала депрессионные процессы формирования НДС за счет центробежной направленности современных геодинамических движений.

Приведенные случаи природно-техногенных геомеханических событий на объектах недропользования с различными горно-геологическими условиями свидетельствуют об аномальных параметрах НДС, формирование которых является следствием вторичного структурирования иерархически блочного массива горных пород под воздействием постоянной подвижности, обусловленной современными геодинамическими движениями. Механизм формирования мозаичной структуры НДС под воздействием современных геодинамических движений схематически показан на рис. 1. При этом развитие катастрофических процессов в одинаковой мере возможно как в зонах концентрации сжимающих напряжений и деформаций, так и депрессивных зонах, где происходит снижение сжимающих напряжений и деформаций вплоть до возникновения растягивающих значений.

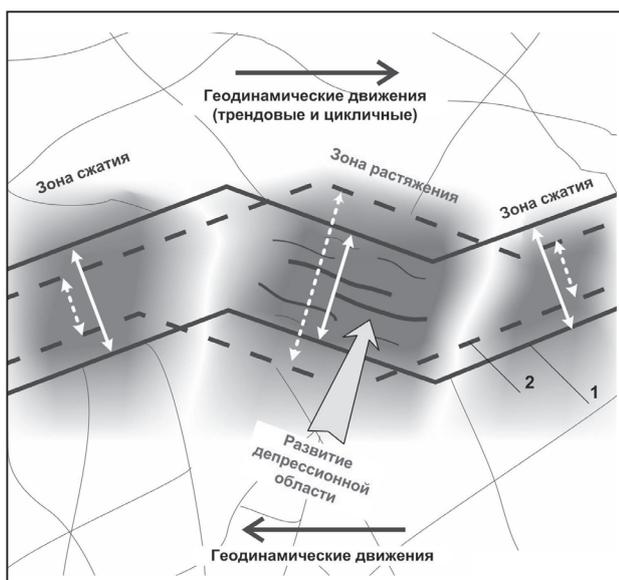


Рис. 1. Схема формирования аномальных зон напряженно-деформированного состояния

Вид природно-техногенных событий и процессов на объектах недропользования зависит от того, в какую зону мозаичного напр они попадают. Указанные случаи соответствуют депрессионным зонам. На Высокогорском месторождении депрессионное НДС, возникшее в результате подвижки, вызвало проседание массива и земной поверхности. Над Южной залежью оно обеспечило свободное обрушение массива до земной поверхности.

Таким образом, в массиве горных пород, представляющем собой иерархически блочную среду, под влиянием современных геодинамических движений происходит вторичное структурирование, создающее мозаичную структуру поля НДС с различными параметрами напряжений и деформаций. Возникновение природно-техногенных событий на объектах недропользования возможно как в зонах концентрации напряжений и деформаций, так и в депрессионных зонах, где происходит разгрузка массива горных пород.

РАДОН В ОБВОДНЕННЫХ РАЗЛОМНЫХ ЗОНАХ БАЙКАЛЬСКОГО РЕГИОНА: УРОВНИ СОДЕРЖАНИЙ И ИХ ВАРИАЦИИ В ПРОСТРАНСТВЕ И ВРЕМЕНИ

К.Ж. Семинский^{1,2}, А.К. Семинский¹

¹- Институт земной коры СО РАН, Иркутск; zzzsancheszz@gmail.com

²- Иркутский научный центр СО РАН; Иркутск, seminsky@crust.irk.ru

Регион, в центральной части которого находится о. Байкал, принадлежит к сибирским территориям с активно развивающимся промышленным и туристическим комплексом. Он отличается высокой сейсмичностью, связанной с процессом рифтообразования у южного края Сибирской платформы. Как следствие, изучение содержания радона в подземных водах региона, кроме уранопоисковых и экологических задач, имеет особое значение в рамках проблемы прогноза землетрясений. Работы по выявлению эманационных предвестников сильных сейсмических событий должны базироваться на предваряющем анализе радиоактивности подземных вод, которая в Прибайкалье системно практически не изучалась. В связи с этим целью исследований было провести классифицирование водопроявлений Байкальского региона по содержанию радона (Q , Бк/л), выявить влияние разломов на значения Q , а также установить закономерности изменчивости данного параметра в пространстве и времени. В основу анализа положено более 200 определений содержания радона в водопроявлениях Прибайкалья и Забайкалья, а также результаты мониторинга параметра Q в 8 пунктах. Установлено, что подземные воды Байкальского региона делятся на семь групп по содержанию радона (I-VII). Закономерности пространственного распределения водопроявлений, относящихся к разным группам, определяются вещественным и структурным факторами. Забайкалье является территорией распространения интрузивных пород с повышенным содержанием урана. В этой части Байкальского региона подземные воды с фоновым содержанием радона относятся к группе II, а аномалиями являются источники, принадлежащие к группам III-VI. В Прибайкалье распространены источники из двух первых групп, у которых $Q < 100$ Бк/л: группа I отражает фоновые содержания радона в подземных водах, а группа II – аномальные концентрации. Главной причиной существования аномалий является наличие разломов, в зонах влияния которых подземные воды обогащены радоном вследствие повышенной проницаемости горных пород и их дробления, связанного с перемещением крыльев. Временные вариации содержания радона, согласно данным мониторинга параметра Q в водоисточниках Прибайкалья, происходят главным образом в пределах значений, соответствующих определенной группе. Они имеют колебательный характер, который отчетливо проявляется при частоте мониторинговых измерений 1 раз в две недели и определяется в основном метеорологическими факторами. Сезонные вариации температуры воздуха и атмосферного давления приводят к изменению температуры подземных вод, разбавлению их осадками, промерзанию верхнего слоя грунтов и другим явлениям, которые обуславливают общее повышение значений Q зимой и их понижение летом. Сейсмическая активность воздействовала на содержание радона в источниках подземных вод в меньшей степени, так как сильные землетрясения не происходили в течение периода мониторинговых измерений.

В итоге исследования охарактеризована радоновая активность подземных вод обширного региона, причем особый акцент сделан на закономерностях пространственной и временной изменчивости содержания ^{222}Rn в водопроявлениях с $Q < 185$ Бк/л. Эти – нерадоновые – воды распространены в Прибайкалье, которое принадлежит к наиболее населенным территориям Восточной Сибири. В плане разработки проблемы прогноза землетрясений необходима организация в Прибайкалье разветвленной системы мониторинга. Ее главной особенностью должны быть ежедневное опробование сети водопроявлений, отличающихся повышенным содержанием радона (группа II) и отчетливым сезонным трендом для параметра Q . Отклонение от этого тренда будут являться предметом целенаправленного анализа, поскольку могут свидетельствовать о форшоках или триггерных эффектах, предваряющих сильное сейсмическое событие. Работа выполнена в рамках Интеграционной программы ИНЦ СО РАН «Фундаментальные исследования и прорывные технологии как основа опережающего развития Байкальского региона и его межрегиональных связей».

СМЕНА ВРЕМЕН ГОДА КАК ВОЗМОЖНЫЙ ТРИГГЕР ВОЗНИКНОВЕНИЯ СИЛЬНЫХ ($M \geq 6$) ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ОЦЕНКА ЕЕ СЕЙСМОПРОГНОСТИЧЕСКОЙ ЗНАЧИМОСТИ (на примере Курило-Камчатского региона)

Ю.К. Серафимова

КФ ФИЦ ЕГС РАН, Петропавловск-Камчатский; yulka@emsd.ru

В последние годы у исследователей интерес вызывает изучение влияния на сейсмичность периодических и квазипериодических природных ритмов. В ряде работ показано, что возникновение сильных землетрясений связано с определенными фазами таких долгопериодных природных ритмов как, например, 18.6-летний лунный цикл, 11-летний цикл солнечной активности, а также их долей и кратных. При этом не остаются без внимания и относительно короткопериодные воздействия, например, в течение времени не более одного года. В работе на

примере Курило-Камчатского региона исследуется внутригодовое распределение сильных $M \geq 6.0$ землетрясений по временам года (сезонам). Особенностью методического подхода является использование астрономических времен года, которые определяются датами солнцестояния и равноденствия. Для каждого землетрясения рассчитывалось значение фазы сезона, в котором оно произошло. Принимая продолжительность сезона за единицу, фаза события рассчитывается как отношение разности времени между возникновением события и началом соответствующего сезона к продолжительности сезона.

На основе анализа распределения сильных землетрясений Камчатки и Курильских островов в зависимости от фаз астрономических сезонов показано, что переход от осени к зиме и, в меньшей степени, переход от весны к лету, можно рассматривать как фактор, обуславливающий повышенную частоту их возникновения. Оценка наличия статистически значимой связи между определенными фазами астрономических сезонов и возникновением сильных землетрясений может найти применение при прогнозировании сейсмической активности. Проверка этой гипотезы осуществлялась следующим образом. Для каждой выборки землетрясений с учетом их энергетических параметров и для каждой из рассматриваемых смен сезонов (осень-зима, зима-весна, весна-лето и лето-осень) анализировалось соответствие наличия или отсутствия прогностического признака "смена сезона" произошедшим землетрясениям. За меру эффективности использования сейсмопрогностического признака принималось отношение числа "опасных" диапазонов фаз, в течение которых происходили землетрясения, к числу диапазонов, в которых ожидаются землетрясения, возникающие случайным образом.

Для Камчатки обнаружен рост величины эффективности признака "смена сезона" при переходе от осени к зиме, что позволяет его использовать в практике работы по оценке сейсмической опасности для уточнения времени возникновения сильных землетрясений с $M \sim 6.0$ и более (вероятность случайного возникновения таких землетрясений $P \leq 0.15$). "Опасный" диапазон фаз соответствует периоду времени с 04 декабря по 08 января. Для землетрясений из района Курильских островов использование признака "смена сезонов" не приводит к повышению эффективности в прогнозировании времени их возникновения.

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ПРЕДВЕСТНИК КАТАСТРОФ – ИНТЕРПРИТАЦИЯ И НЕКОТОРЫЕ СЛЕДСТВИЯ

В.Н. Сергеев

Институт динамики геосфер РАН, Москва; svn@idg.chph.ras.ru

При всем многообразии катастрофических событий в различных системах существуют явления предшествующие, по крайней мере, многим из них. Таким явлением оказывается «критическое замедление» перед катастрофой [Дубровский, Сергеев, 2004; Руманов, 2013; Гилмор, 1994; Scheffer et al., 2012]. В [Дубровский, Сергеев, 2004] приводится следующая формулировка этого утверждения. Если система имеет при некотором наборе характеризующих ее критических параметров положение неустойчивого равновесия, разделяющего области значений параметров, соответствующих устойчивому и неустойчивому состоянию системы, то в устойчивой области будут возникать при внешнем воздействии волны, частота которых должна стремиться к нулю по мере приближения системы к критическому положению неустойчивого равновесия при конечных размерах волновых возмущений. Согласно такому принципу любая катастрофа должна предвещаться медленными волновыми изменениями некоторых, характеризующих состояние системы параметров. Частота этих собственных волновых движений очага неустойчивости стремится к нулю по мере приближения к порогу неустойчивости–катастрофы.

В математической теории катастроф [Гилмор, 1994] «критическое замедление» называется одним из «флагов» катастрофы, то есть событием ей предшествующим. В [Scheffer et al., 2012] приводится сводка данных по обнаружению (или не обнаружению) предвестников катастроф в различных системах. Уменьшение частоты собственных волновых движений очага неустойчивости при приближении к порогу катастрофы может быть использовано при исследовании триггерных эффектах в геосистемах.

МОНИТОРИНГ НАВЕДЁННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЙОНАХ ПРОВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАЛОАПЕРТУРНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ АНТЕНН

С.И. Сергеев, И.А. Санина, С.А. Королёв, С.Г. Волосов, М.А. Нестеркина, Н.Л. Константиновская, Т.В. Данилова

Институт динамики геосфер РАН, Москва

Важнейшая цель сейсмического мониторинга в районах проведения горных работ – заблаговременное, до возникновения наведённых землетрясений с высокой магнитудой, обнаружение сейсмической активности или изменения её режима. Слабая техногенная сейсмичность может быть индикатором начала триггерных геодинамических процессов, приводящих к событиям с ощутимым макросейсмическим эффектом и значительным материаль-

ным уроном. Для раннего обнаружения сейсмической активности в районах проведения горных работ мы предлагаем использовать технологию, предусматривающую установку двух сейсмических антенн (см. рис. 1) и применение метода кросс-корреляции волновых форм для обработки сигналов [Адушкин, Китов, Нестеркина и др., 2015]. Элементы этой технологии апробированы нами в работах по мониторингу сейсмичности Восточно-Европейской платформы, контролю сейсмического режима ответственных объектов инфраструктуры и наблюдениям в районе карьеров Курской магнитной аномалии.

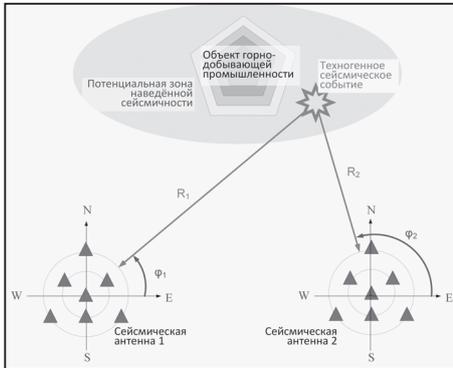


Рис. 1. Схема размещения сейсмических антенн в районе горных работ

В качестве образцов волновых форм для поиска наведённой сейсмичности предлагается использовать запись взрывов в горных выработках и карьерах в предположении, что реакция среды на воздействие в той же области пространства будет иметь схожую форму [Vasterling, Wegler, Bruestle, Becker, 2017]. Основные преимущества сейсмических антенн – высокая чувствительность и возможность точного определения положения источника – позволят обнаружить слабые события даже в условиях сильных техногенных помех. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-17-00095).

РЕЗОНАНСЫ ГРАВИТАЦИОННЫХ ПРИЛИВОВ – ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТРИГГЕРЫ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В.Г. Сибгатулин¹, А.А. Кабанов²

¹ - Сибирский федеральный университет, Красноярск; ec_ropr@mail.ru

² - СКТБ «Наука» ИВТ СО РАН, Красноярск; weller86@inbox.ru

Предложен способ прогноза времени возникновения резонансов четырнадцатидневных гравитационных приливов в Земной коре. Кроме «классических» приливов на напряжённо-деформированное состояние (НДС) геологической среды оказывают влияние и другие циклические гравитирующие факторы. В частности, вокруг Солнца вращается не центр тяжести планеты Земля, а так называемый барицентр системы Земля - Луна. При этом, в связи с различием масс (масса Луны \approx в 81 раз меньше массы Земли), барицентр находится внутри Земли и колеблется на глубине от 1200 до 1900 км от поверхности Земли в течение лунного месяца. Известно, что если центр тяжести физической системы не совпадает с геометрическим центром, то при вращении возникают периодические колебания напряжений (деформаций). Помимо гравитационного (приливногo) влияния Луны и Солнца литосфера Земли постоянно подвергается волнам сжатия-растяжения за счет изменения положения барицентра. Сопоставление времени сильных ($M \geq 6.0$) землетрясений на земном шаре за XX и XXI века с расчетными резонансами гравитационных приливов для каждого сейсмического события, позволяет утверждать, что около 80% сильных землетрясений по времени с точностью ± 12 часов совпадают с расчетными резонансами. Резонансы гравитационных приливов являются триггерами подавляющего большинства сильных и катастрофических землетрясений на Земном шаре. Помимо сейсмических очагов резонансы приливов оказывают влияние и на другие геологические объекты. В процессе исследований выявлено влияние резонансов на такие объекты, как скальные массивы, флюидонасыщенные коллекторы в Земной коре, а также техногенные сооружения (плотины ГЭС).

Дана экспериментальная оценка величины изменений напряжённо-деформированного состояния геологической среды под влиянием резонансов (от 1,0 до 5,0% величины горного давления). Исходя из вышеизложенного, можно утверждать: 1). Резонансы гравитационных приливов – значимый энергетический источник геодинамических процессов в Земной коре. Резонансы приливов – основной триггерный фактор для возникновения сильных ($M > 5.0$) землетрясений. 2). Энергия резонанса приливов достаточна для возбуждения стоячих волн в нефтегазовых залежах, что позволило предложить технологию прямых поисков нефти и газа – ФРС (Флюидная резонансная сейсморазведка). 3). Колебания давления в горных породах неизбежно сопровождаются сейсмoeлектрическим эффектом. Отсюда следует потенциальная возможность разработки технологии поиска месторождений твёрдых полезных ископаемых на основе вызванной поляризации под влиянием энергии резонансов гравитационных приливов. 4). Вероятна роль резонансов в формировании одиночных деформационных волн типа солитонов (основы так называемого тектонического оружия), что позволит прогнозировать «волны убийцы» не только в океанах, но и в Земной коре для обеспечения безопасности крупных техногенных сооружений (плотины и др.).

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ХИБИНСКОГО И КОВДОРСКОГО МАССИВОВ

Л.А. Сим¹, А.В. Маринин¹, Д.В. Жиров²

¹- ИФЗ РАН, Москва. sim@ifz.ru, marinin@ifz.ru

²- Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, zhirov@geoksc.apatity.ru

Изучение напряженно-деформированного состояния Хибинского массива произведено на карьерах рудников Центральный, Восточный, Олений ручей, а также в подземных выработках рудника Кировский; в пределах Ковдорского массива тектонические напряжения восстановлены на апатит-магнетитовом месторождении на руднике «Железный» и по ориентированному керну пяти скважин, пробуренных в южном обрамлении этого рудника. Тектонические напряжения восстанавливались кинематическим методом [Гущенко, 1979] и методом катакластического анализа (МКА) по программе STRESSGeol [Ребецкий, 2007], а также по трещиноватости в четвертичных отложениях с помощью методики выделения сколовых сопряженных трещин [Гзовский, 1975].

Оси максимальных девиаторных сжимающих напряжений современного поля напряжений, согласно полученным по результатам замеров *in situ* на рудниках Хибинского массива, ориентированы субпараллельно простиранию рудных тел [Сейсмичность..., 2002]. Анализ локальных палео стресс-состояний (ЛСС) по Хибинскому массиву, восстановленных по МКА и бороздам скольжения, показывает большое разнообразие положений осей главных нормальных напряжений (рис. 1) и лишь частичное соответствие с таковыми современного поля. Результаты анализа трещиноватости и индикаторов относительных смещений на Ковдорском массиве показывает минимум два этапа активизации с относительно автономным развитием тектоники и соответствующих полей напряжений. Такой режим может быть объяснен накоплением в массиве напряжений выше, чем во вмещающей раме, поэтому они могли реализоваться приоритетно и относительно независимо. Периоды, в ходе которых преобладало региональное поле напряжений, усложняли и реактивировали структуру разрывной тектоники [Жиров, Сим, Рыбин, Маринин, 2012].

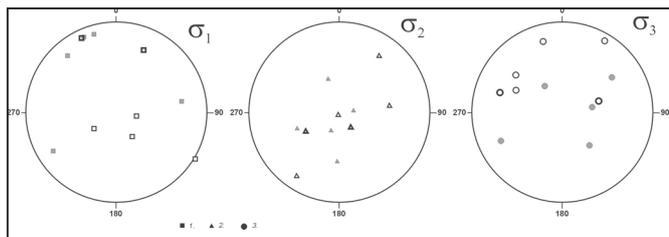


Рис. 1. Круговые диаграммы (стереографическая проекция на верхнюю полусферу) положения осей главных напряжений в пределах рудников Хибинского массива по данным реконструкции локальных стресс-тензоров с использованием метода катакластического анализа.

Значками показаны оси сжимающих напряжений: 1 – минимальных (σ_1); 2 – промежуточных (σ_2); 3 – максимальных (σ_3). Цвет заливки значков меняется для определений, полученных на разных рудниках: Кировский (черная), Центральный (серая), Восточный (без заливки с толстой линией) и Олений ручей (без заливки с тонкой линией)

В целом для Хибинского и Ковдорского массивов отмечена нестабильность ориентировок осей девиаторного сжатия и растяжения, которая может быть обусловлена сложной тектонической эволюцией и характером взаимодействия собственных (локальных) и региональных полей напряжений.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАРНЫХ ВОЛН С МОЛЕКУЛЯРНЫМИ ОБЛАКАМИ – ЗАПУСКАЮЩИЙ МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ЗВЕЗД И ПЛАНЕТНЫХ СИСТЕМ

Н.Н. Смирнов^{1,2}, Б.П. Рыбакин^{1,2*}, Л.И. Стамов^{1,2}

¹ - Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва

² - Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», Москва; rybakin1@mail.ru

Взаимодействие ударных волн различной интенсивности с межзвездными облаками является одним из самых распространенных процессов кругооборота вещества в Галактиках. Ударные волны образуются в результате взрывов сверхновых звезд, столкновений гигантских облаков, выбросов (джетов) из активных звезд и т.д. Разработка теории формирования звезд малой массы (~ 0.05 до 3 ММ) остается одной из сложных и важных задач теоретической астрофизики. Процесс звездообразования является результатом сложной динамики межзвездного газа с участием нелинейного влияния турбулентности, гравитации, магнитного поля, излучения и т.д. Межзвездная среда (МЗС) по своей структуре существенно неоднородна. Она состоит из газа и пыли, и составляет от 10 до 15% от общей массы в галактическом диске. В МЗС существуют области, в которых вещество имеет большую плотность. Эти неоднородности возникают по разным причинам, но независимо от природы возникновения, такие сгустки или мо-

лекулярные облака (МО) качественно отличаются от МЗС. Протозвездные облака представляют собой трехмерные гравитационно–связанные газовые образования с различными массами и пространственными размерами.

Эволюция протозвездных сгустков, с того момента, когда образуются турбулентные потоки и до того времени, когда они достигают звездных плотностей, охватывает огромный диапазон масштабов как пространственных, так и временных. В работе представлены результаты трехмерного численного моделирования особенностей формирования и эволюции филамент, процессов абляции вещества и образования протозвездных ядер в процессе гидродинамического взаимодействия молекулярных облаков МО с ударными волнами. Исследован процесс взаимодействия ударных волн на МО с различными типами границ – сглаженными и резкими. Взаимодействие ударных скачков носит сложный динамический характер. В начальные моменты времени в МО появляется отраженная ударная волна, которая движется навстречу падающей ударной волне. На поверхности МО начинается процесс возникновения неустойчивости и уноса вещества с поверхности, возникает неустойчивость Рихтмайера-Мешкова которая начинает развиваться вниз по течению. Следующие этапы расширения молекулярного облака характеризуются формированием сложной волновой структуры. После прохождения первичной ударной волны формируется система вихрей, которая динамически изменяется с течением времени.

В представленной работе подробно исследуется стратификация плотности в филаментах. Показано, что в определенные моменты плотности возникают плотные ядра, контраст плотности в которых на порядок превышает начальное отношение плотности молекулярного облака к межзвездной среде $\chi = \rho_{mc}/\rho_{ism}$.

ИЗУЧЕНИЕ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ СВОЙСТВ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ СРЕДЫ С ВЫХОДОМ НА АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ЗАРОЖДЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ПРИРОДНЫХ КАТАСТРОФ

А.Л. Собисевич, Л.Е. Собисевич, КХ. Канониди

ИФЗ РАН, Москва; sobis@ifz.ru

Разработка уточненных динамических моделей развития природных процессов, включая и новые методы прогнозирования разномасштабных геофизических катастроф, являются одной из главных фундаментальных проблем геофизики. Новые математические модели и технологии анализа волновых движений в окрестности ограниченных неоднородных геологических образований расширяют возможности оперативного мониторинга геофизической среды, включая и оценки геоэкологических опасностей.

Выполнен анализ волновых процессов в окрестности ограниченных неоднородных геологических структур и рассмотрены тенденции трансформации волновых движений, имеющих место в слоистых неоднородных геологических отдельностях на этапах подготовки и развития катастрофических землетрясений.

На качественно новом уровне изучены определяющие свойства геологической среды и построена феноменологическая модель, адекватно отражающая изменчивость геофизических полей (сейсмического, акустического, гравитоманнитного и др.) в окрестностях неоднородных локальных образований в процессе формирования и развития разномасштабных катастрофических событий. Полученные новые научные результаты расширяют прогностические возможности определения места и времени возникновения катастрофических сейсмических событий в сложно построенных геологических структурах.

О МОНИТОРИНГЕ НА ШУМАХ НЕОДНОРОДНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Л.Е. Собисевич¹, А.Л. Собисевич¹, Д.А. Преснов¹, Р.А. Жостков¹, А.С. Шуруп^{1,2}

¹ – ИФЗ РАН, Москва; sobis@ifz.ru

² – МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра акустики, Москва

Изучение глубинных неоднородных геологических образований является крупной фундаментальной проблемой, решение которой имеет весьма широкий спектр возможных применений как в планетарном масштабе при изучении особенностей строения мантии и ядра Земли [Яновская, 2015], так и в локальных наблюдениях, например, при мониторинге состояния вулканических систем [Кулаков, 2013]. Среди существующих методов глубинного зондирования особое место отводится пассивной поверхностно-волновой томографии [Presnov, Sobisevich, Shurup, 2016], использующей естественный микросейсмический шум в качестве источника информации о среде, что приводит к сравнительно низкой стоимости и упрощенным требованиям на техническую сторону проведения экспериментальных работ в этом случае. Большинство методов пассивной сейсмоакустической томографии разработаны и применяются на суше, что ставит вопросы о возможности их реализации с использованием глубоководных донных станций. С одной стороны, подводные измерения являются гораздо более зашумлен-

ными по сравнению с наземными за счет присутствия дополнительной помехи в виде гидроакустических волн, а также турбулентного обтекания измерительной аппаратуры течениями, но, с другой стороны, организация широкополосного приема сейсмоакустического поля открывает новые уникальные возможности для мониторинга неоднородных образований не только в океаническом дне, но и в водном слое. В работе обсуждается схема пассивной сейсмоакустической томографии, позволяющая осуществить такой мониторинг, а также демонстрируются результаты обработки данных нескольких натуральных экспериментов, подтверждающие возможности разрабатываемого подхода. *Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №№ 16-29-02046; 16-02-00680).*

МИГРАЦИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ПОСЛЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Г.А. Соболев

ИФЗ РАН, Москва

При анализе записей широкополосных сейсмических станций IRIS обнаружены возникающие после сильных землетрясений цуги колебаний с периодом ≈ 129.5 минут. Они одновременно проявляются на станциях, смещенных по долготе на 180 градусов, и колебания в них имеют противоположную полярность. Времена возникновения цугов на разных станциях демонстрируют миграцию в западном направлении со скоростью 2,5 градуса в час. Цуги раньше регистрируются на станциях, близко расположенных к эпицентру и антиподу эпицентра землетрясения. Цуги хуже проявляются по мере удаления станции от оси эпицентр – антипод эпицентра. Амплитуда колебаний в цугах оценивается величиной в несколько миллиметров и микроГал. Цуги отражают возникновение и миграцию после землетрясений области собственных изгибных колебаний литосферы.

ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ КАЗАХСТАНА, СВЯЗАННЫЕ С ТЕХНОГЕННЫМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ

И.Н. Соколова, Н.Н. Михайлова

Институт геофизических исследований МЭ РК, Алматы, Казахстан; sokolova@kndc.kz

Начиная с 1994 года, на территории Казахстана успешно функционирует сеть мониторинга РГП ИГИ, состоящая в основном из чувствительных сейсмических групп различной конфигурации. Мониторинг сейсмичности Казахстана выявил значительное количество землетрясений в районах, которые традиционно считались асейсмичными. Ряд землетрясений приурочен к местам активного техногенного воздействия.

В докладе приводится информация о событиях техногенной и индуцированной природы на территории Казахстана с использованием как современных инструментальных данных по региональной сети мониторинга, так и по данным международных центров данных. Исследованы техногенные землетрясения на месторождениях твердых полезных ископаемых (Жезказганское месторождение в Центральном Казахстане, золоторудные карьеры Северного Казахстана), на месторождениях углеводородного сырья (нефтегазовое месторождение Тенгиз, газоконденсатное Жанажол), на бывшем Семипалатинском испытательном ядерном полигоне, а также природно-техногенные (индуцированные) землетрясения (в Центральном и Западном Казахстане). Рассматриваются возможные причины их возникновения. Проводится анализ волновой картины записей от источников событий разной природы из одного и того же района с целью их достоверного распознавания.

ГЕНЕРАЦИЯ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ БРИЗОВО-ДОЛИННОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ В СИСТЕМЕ

о. БАЙКАЛ-ТУНКИНСКАЯ ДОЛИНА

А.В. Соловьев¹, Ю.С. Рыбнов²

¹- Национальный исследовательский Томский государственный университет; andrio@mail.tsy.ru

²- Институт динамики геосфер РАН, Москва; rybnov.y@mail.ru

В настоящей работе приводятся результаты измерений акустико-гравитационных волн (АГВ), вызванных бризово-долинной циркуляцией в системе о. Байкал - Тункинская долина. Измерения проводились на базе геофизической станции ИСЗФ «Торы», расположенной в восточной части долины, в июле 2010 г. Сама долина ограничена с севера и юга горными хребтами протяженностью 100-150 км, которые смыкаются на востоке и западе. Высота гор колеблется от 600 до 1200 м.

Для проведения наблюдений использовалась акустическая станция, предназначенная для проведения измерений в полевых условиях. Станция состоит из четырех микробарометров, три из которых размещались на

местности в виде треугольника, а четвертый был установлен внутри. Проведенные исследования показали, что вклад в уровень инфразвукового фона, кроме ветровой турбулентности, вносят некоторые природные источники АГВ. Для системы о. Байкал - Тункинская долина было выделено три таких источника: регулярные (орографический инфразвук или волны с гор); квазирегулярные (фронтальные циклоны и бризово-долинная циркуляция); достаточно редкие (микробаромы). АГВ, обусловленные бризово-долинной циркуляцией, наблюдались в ночные часы, когда ветер был менее 1 м/с, а уровень турбулентного фона не превышал $\approx 0,1 \div 0,2$ Па. За время наблюдений было зарегистрировано четыре аналогичных случая. Амплитуда колебаний равна $\approx 2 \div 4$ Па, а частота $\approx 0,0033 \div 0,005$ Гц. Все колебания имеют азимуты прихода от ближайших горных хребтов Тункинской долины, причем большинство (3 случая) с северного хребта. Скорость их распространения $\approx 10 \div 40$ м/с.

Источником зарегистрированных низкочастотных колебаний является стекание холодного воздуха с горных хребтов в долину. Ночью «порция» холодного воздуха достигает хребта и под влиянием силы тяжести в некоторый момент начинает стекать вниз и происходит адиабатическое нагревание стекающего воздуха. В результате, достигая днища долины, воздух имеет температуру, на несколько градусов превышающую температуру окружающей среды, и становится более легким. Всплывая, воздух охлаждается и опускается вниз. Это происходит циклами. Основным фактором, определяющим движение воздушных масс в сторону долины, является разница температуры водной поверхности оз. Байкал и температуры земли. Движения воздушных масс происходит от более холодной поверхности в сторону более прогретой. Другим условием продвижения воздуха в глубь долины является отсутствие общего переноса воздуха, вызванного прохождением атмосферных фронтов, циклонов или сильных местных ветров.

ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ, ВЫЗВАННЫЕ СЕЙСМИЧЕСКИМИ КОЛЕБАНИЯМИ

А.А. Спивак, Д.Н. Локтев, С.А. Рябова, С.П. Соловьев

Институт динамики геосфер РАН, Москва; spivak@idg.chph.ras.ru

Изучение вариаций электрического поля при распространении сейсмических волн представляет значительный интерес с точки зрения разработки новых, более совершенных методов и способов описания строения земной коры и диагностики ее геодинамического состояния. Интенсивность преобразования энергии колебаний среды в энергию электрического поля во многом определяется свойствами среды и характеристиками ее напряженно-деформированного состояния. Анализ пространственных и временных характеристик, определяющих сейсмоэлектрический эффект, позволяет не только устанавливать активные крупные тектонические структуры в виде разломных зон и их отдельные активные участки, но также оценивать свойства среды на сейсмически неактивных территориях, а именно: получать информацию о свойствах среды, действующих в ней напряжениях, а также особенностях ее деформирования.

Настоящая работа посвящена сопоставительному анализу амплитудных вариаций поля сейсмических колебаний (волны землетрясений, сейсмические сигналы, вызванные карьерными взрывами и т.д.) и синхронных с ними вариаций электрического поля. В качестве исходных данных при анализе использовались цифровые ряды, полученные в результате регистрации сейсмических колебаний и вертикальной компоненты напряженности электрического поля E_0 на земной поверхности, выполненной в условиях Геофизической обсерватории "Михнево" ИДГ РАН (ГФО МНВ), расположенной в 85 км к югу от города Москвы. Координаты ГФО «Михнево»: 54,959°N; 37,766°E. Отсутствие в ближайшей окрестности ГФО МНВ источников электромагнитных помех благоприятствует выполнению инструментальных наблюдений. Результаты инструментальных наблюдений свидетельствуют о наличии сейсмоэлектрического эффекта, который хорошо регистрируется в зоне влияния глубинной тектонической структуры в отсутствие сильных возмущений, вызванных другими источниками (прохождение атмосферных фронтов, грозовые явления, сильный ветер и т.д.). При этом интенсивность преобразования механической энергии сейсмических волн в энергию электрического поля определяется амплитудой сейсмического сигнала. Впервые получена количественная зависимость между амплитудами сейсмического и вызванного электрического сигнала в конкретных условиях (рис.1). Следует ожидать подобные эффекты и на других участках земной коры, в том числе в сейсмически спокойных районах Восточно-Европейской платформы.

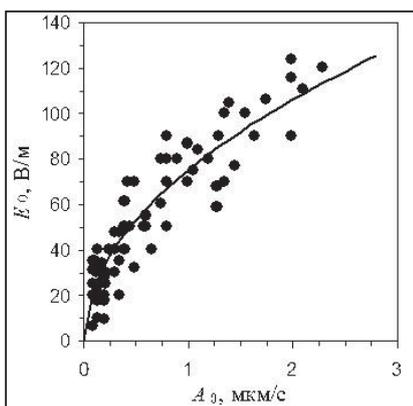


Рис. 1. Зависимость между амплитудами сейсмического сигнала A_0 и вызванных вариаций электрического поля E_0 на ГФО МНВ ИДГ РАН (результат выборочной обработки данных за 2014 г.)

МИКРОПУЛЬСАЦИИ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ И ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИ СИЛЬНОЙ ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ

А.А. Спивак, Ю.С. Рыбнов, С.П. Соловьев, В.А. Харламов

Институт динамики геосфер РАН, Москва; spivak@idg.chph.ras.ru

Исследование геофизических эффектов, сопутствующих грозовой активности – одного из наиболее ярких природных явлений, представляет значительный интерес как с точки зрения понимания механизма и разработки модели грозовых явлений, так и совершенствования подходов к их прогнозированию с целью предупреждения нежелательных и катастрофических последствий. В настоящей работе представлены результаты анализа данных инструментальных наблюдений за электрическим полем и микропульсациями атмосферного давления в приземной атмосфере, выполненных во время грозовых явлений в г. Москве в период 2014-2016 гг. Показано, что сильные грозы характеризуются наличием трех стадий развития явления. На первой стадии (за 0,5–1 час до прихода грозового фронта) наблюдаются длиннопериодные (период ~ 10 мин) вариации напряженности электрического поля с амплитудой 2000–4000 В/м, внутриоблачные свечения, а также повышенные значения акустического импе-

дансного соотношения: $I(t) = \frac{P(t)}{\rho V(t)}$, где $P(t)$ – пульсации атмосферного давления, $V(t)$ – горизонтальная составля-

ющая скорости ветра, ρ – плотность воздуха, t – время. Вторая стадия, наступающая сразу после прихода холодного атмосферного фронта и продолжающаяся в течение всего периода основной грозовой активности (интенсивные молниевые разряды типа облако-земля, количество которых может достигать 2-3 разряда в минуту), характеризуется резким повышением амплитуды (более 6000 В/м), а также изменением спектральных характеристик вариаций электрического поля: преимущественный период вариаций составляет ~1 мин. На этой стадии величина нормированного акустического импедансного соотношения (НИС) уменьшается практически до нулевого значения. На заключительной (третьей) стадии явления длительностью около 0,25–0,5 час амплитуда вариаций электрического поля снижается до ~ 2000–3000 В/м с увеличением периода вариаций до ~ 15 мин. НИС возрастает до значений, существенно превышающих 0,5. Увеличение НИС до значений 0,8–0,9 на первой и третьей стадии явления свидетельствует о близости фазовых характеристик скорости ветра и пульсаций атмосферного давления, что является одним из основных признаков существования в атмосфере внутренних гравитационных волн (ВГВ). При этом следует отметить, что характерные периоды микробарических пульсаций на первой и третьей стадиях развития грозового явления близки между собой и составляют около 11 мин.

Выполненные с привлечением метеорологических данных (атмосферное давление, температура воздуха, влажность) оценки дают для периода вертикальных колебаний верхней кромки грозового облака (фактического источника ВГВ) величину 9–10 мин. Это хорошо согласуется с результатами регистрации ~11 мин) и служит дополнительным подтверждением наличия ВГВ на стадии, предшествующей приходу грозовой ячейки, и на заключительной стадии явления. Напротив, практически нулевые значения НИС в период интенсивных грозовых проявлений (вторая стадия) демонстрируют существенные различия в фазах вариаций скорости атмосферных движений и давления, что можно объяснить формированием турбулентных движений воздушных масс.

Полученные результаты свидетельствуют о наличии предвестников сильной грозовой активности в виде специфических вариаций электрического поля и микробарических пульсаций, которые могут служить индикатором приближения грозы.

О ТРИГГЕРАХ И МЕХАНИЗМЕ ОКЕАНСКОГО РИФТОГЕНЕЗА

С.Б. Стажевский

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Новосибирск; stazh@misd.ru

Выдвинута и экспериментально обоснована версия о связи глобальной рифтовой системы, осложняющей гребень срединно-океанических поднятий или, что то же, хребтов (СОХ), с вертикальной тектоникой. Исследования проделаны на оригинальном лабораторном стенде с использованием модельных материалов. Изучены особенности деформированного состояния выполненных из этих материалов сплошных, а также ослабленных системой нарушений слоев, моделирующих литосферу планеты в ходе образования и развития в них впадин. В опытах получены основные морфоструктурные элементы срединно-океанических хребтов; с единых позиций объяснена реализация у них ряда характерных черт. Показано, что пересекающие СОХ разломы океанского дна, известные как трансформные, имеют возраст больше, чем у поднятий, являются «пассивными» участниками сегментации последних, а также формирования у них при определенных условиях латеральной «ступенчатости». Сопоставление

результатов экспериментов с существующими фактическими данными подтверждает адекватность новой геотектонической гипотезы. В соответствии с ней запускаются механизм образования срединных хребтов и рифтогенез вдоль их простирающихся прогибаниями литосферы, которые развиваются на фоне ее сжатия, связанного с сокращением размеров остывающей Земли.

ДЕФОРМАЦИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВЫБУРИВАНИИ И ИСПЫТАНИЯХ КЕРНА

Ю.П. Стефанов^{1,2}, А.С. Романов^{1,3}, А.В. Мясников⁴

¹ - ИНГГ СО РАН, Новосибирск;

² - ИФПМ СО РАН, Томск; yu_st@mail.ru;

³ - ТГУ, Томск; alesandro_pato22@mail.ru;

⁴ - Сколтех, Сколково; A.Myasnikov@skoltech.ru.

Основной целью экспериментальных исследований деформации образцов горных пород является построение модели поведения и определения параметров для условий их залегания. При этом часто возникают сложности, связанные с состоянием образцов, а также их сложным нелинейным поведением. Наличие дефектов в образцах может быть связано не только с их естественным строением, но и с процессом отбора керна, а также его последующей разгрузкой и сопутствующими явлениями фильтрации жидкости и газа. Нелинейные особенности поведения связывают с внутренним строением, наличием микро- и мезотрещин, пор и неоднородностей вещественного состава. Таким образом, для решения задачи построения модели и оценки параметров среды необходимо исследовать ряд процессов, начиная с выбуривания керна и, заканчивая интерпретацией диаграмм нагружения, включая разгрузку.

В работе представлены результаты численного исследования образования зон пластической деформации и трещин в процессе выбуривания и последующей разгрузки керна. Показано, что уже на этапе выбуривания в керне и в окружающей среде могут возникнуть зоны необратимой деформации. Размеры этих зон и величина деформации определяются свойствами породы и напряженным состоянием в среде.

Выполнена интерпретация некоторых особенностей деформирования образцов в ходе испытаний, включая разгрузку. Показано различие поведения образцов пород в зависимости от строения и условий испытаний. Представлены варианты модели, описывающей поведение образцов горных пород разного строения. Моделирование деформационного поведения горной породы осуществлялось путем численного решения системы уравнений механики сплошных сред. Определяющие соотношения построены на основе модифицированного варианта предельной поверхности Друккера-Прагера-Николаевского с неассоциированным законом течения. Задачи решались в двумерной (плоская деформация) и трехмерной постановках.

ЭМАНАЦИЯ РАДОНА КАК ИНДИКАТОР РАБОТЫ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ И ПРИЛИВНЫХ СИЛ

М.В. Сухоруков^{1,2}

¹ - Институт динамики геосфер РАН, Москва

² - Московский физико-технический институт, Долгопрудный

Появление значительного выброса подземных газов на поверхности Земли связано не только с активизацией недр. В условиях стабильности микросейсмического фона и геодинамической обстановки, относительной стационарности уровня подземных вод увеличение эманации газов может быть связано с синхронностью действия атмосферного давления и лунно-солнечных приливных сил, которые деформируют земную кору [Адушкин, Спивак, 2014]. В земной коре происходит миграция глубинных газов через каналы, поры и трещины в приповерхностные слои, а далее - в атмосферу. Деформация среды распространения газов, раскрытие каналов способствует возникновению аномалий газовых потоков, для надежного фиксирования которых необходимо выбрать максимально доступный объект.

Среди эманацирующих газов особое место занимает радиоактивный газ ²²²Rn, концентрация которого в общем объеме крайне низка. Однако повсеместное распространение в земной коре, доступная регистрация аппаратурой вследствие α - радиоактивности, наличие побочных эффектов в атмосфере сделали его изучение крайне актуальным. Многими исследователями замечено, что аномалии эманации подземных газов, в том числе радона ²²²Rn часто встречаются в районах с тектоническими структурами, в зонах их влияния, а также в местностях с растяжением земной коры [Уткин, Юрков, 2010; Фирстов, Макаров, 2015; Рудаков, 2009].

В докладе, анализируя ход временных рядов объемной активности газа радона ²²²Rn, вертикальной составляющей приливной силы, атмосферного давления, приводятся общие периодичности (12 часов - приливные волны M_2, S_2, N_2, K_2 ; 24 часа - приливные волны P_1, O_1, K_1 и 14 суток - приливная волна M_t), коэффициенты корреляции, особен-

ности синхронности указанных рядов. Отмечается совпадение коротких периодов (12 часов и 24 часа) у рядов приливных сил и объемной активности радона ^{222}Rn со значительной амплитудой, их значимая корреляция, также отмечается значимая корреляция атмосферного давления с временными рядами объемной активности радона ^{222}Rn , выделение общих долговременных периодов (от 1.5 до 12 суток). Делается вывод о влиянии приливных воздействий и атмосферного давления на интенсивность подземного газа радона ^{222}Rn на участках с тектоническими структурами разной активности.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ФРОНТА ГОРЕНИЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫМИ УГЛЕВОДОРОДАМИ

А.А. Таирова, Г.В. Беляков

Институт динамики геосфер РАН, Москва

В мире активно развиваются новые технологии разработки месторождений минерального сырья, для которых характерно значительное увеличение объемов извлекаемой и перемещаемой горной породы, откачки и закачки флюидов, проведение работ на больших глубинах, разработка месторождений трудно извлекаемых углеводородов, таких, например, как баженовская свита. Особенностью бажена, как сланцевой формации, является то, что площадь её распространения более 1 млн км², и то, что в ее составе меньше сернистых соединений, в отличие от традиционных углеводородов, что облегчает ее дальнейшую переработку. Для разработки этой породы используют термогазовый метод воздействия - введение воздушной массы в пласт. При подаче воздуха в трещиноватые пропластки создается подвижная зона низкотемпературного окисления, при этом происходит вытеснение нефти газифицированными продуктами реакции, что позволяет начать пиролизу керогена. После прохождения фронта разогрева меняются фильтрационные свойства коллектора за счёт изменения его проницаемости, что может привести к повышению притока воздушной массы, локальному ускорению процесса пиролиза керогена и потери устойчивости фронта разогрева. Отношение количества тепловой энергии, которая выделяется при горении вещества нефтематеринской породы, к энергии, которая поглощается слоем ее поверхности при фазовых переходах (плавление, испарение) определяет эффективность добычи углеводородной массы.

В данной работе на лабораторной модели изучается динамика горения и влияние ее на фильтрационные процессы применительно к баженовской свите. Экспериментальная работа проводилась на оригинальной установке. В качестве породы использовался полиметилметакрилат (оргстекло), который при термическом воздействии разлагается на эфир метилметакрилата и метилакрилата, что моделировало газифицированные продукты реакции. Коллектор был смоделирован при помощи двух пластин оргстекла, расположенных параллельно друг другу, зазор между которыми 1-2 мм имитировал щель. На входе в ячейку подавался разогретый воздух, а при помощи компрессора создавался поток (скорость воздушного потока $v \sim 10^3$ см/с), который уносил продукты горения (газы, жидкость). Окислителем реакции выступал кислород, содержащийся во вводимом в ячейку воздухе. Газифицированные продукты горения, продвигаясь вдоль щели (скорость волны горения $v \sim 10^{-2}$ см/с), нагревали ее стенки, превращая материал стенок в жидкость и газ, тем самым изменяя фильтрационные свойства. Создана лабораторная установка, позволяющая рассмотреть продвижение фронта плавления материала стенок щели и фильтрационные процессы, происходящие при горении ее поверхности. По экспериментальным данным произведены оценки уноса массы с поверхности щели нагретыми спутными потоками воздуха и газифицированными продуктами горения. *Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-05-00605).*

СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ И СЕЙСМИЧНОСТЬ ЗЕМЛИ

Н.Т. Тарасов

ИФЗ РАН, Москва; tarasov@ifz.ru

Исследованию влияния магнитных бурь на сейсмичность был посвящен целый ряд работ. Такой интерес вызван тем, что это позволяет получить дополнительную информацию о периодах повышения сейсмической опасности, изучить триггерное воздействие на сейсмичность факторов разной физической природы и более полно понять закономерности Солнечно-Земных связей. Однако опубликованные результаты нередко носят противоречивый характер, что требует дополнительных исследований. В данной работе продолжено изучение влияния магнитных бурь с внезапным началом (SSC) на глобальную сейсмичность Земли.

С этой целью использовался каталог глобальной сейсмичности NEIC и каталог магнитных бурь NOAA. Для выделения вызванных изменений сейсмичности на фоне ее естественных вариаций использовалась методика наложения эпох. Получена осредненная по 1071 SSC (за период 1973-1981 гг.) зависимость ежесуточного количест-

ва землетрясений от времени в пределах временных окон ± 30 сут от начала магнитных бурь. Показано, что после SSC происходит уменьшение количества землетрясений, а через 5-6 сут их число вновь возрастает, оставаясь при этом ниже уровня фона. В первые 5 сут сейсмичность уменьшается относительно уровня фона на 2%, а на 30 суточном интервале в целом – на 1%. Оценки статистической значимости показали, что наблюдаемые изменения высоко значимы. Интересным оказалось то, что отмеченное понижение сейсмичности началось, как минимум, за 2-3 сут до SSC, и, следовательно, бури не могли быть его причиной. SSC возникают на Земле через несколько суток после коронарных выбросов и вспышек на Солнце, что обусловлено относительно невысокой скоростью распространения солнечной плазмы. Однако электромагнитное излучение (ЭИ) Солнца достигает Земли всего за 8.2 мин, что позволяет предположить, что оно и является причиной изменения сейсмичности. Для проверки этой гипотезы по той же самой методике было изучено изменение интенсивности ЭИ Солнца в радиочастотном диапазоне, которая часто используется как мера его ионизирующего излучения. Оказалось, что во временном окне ± 30 сут от начала бурь мощность ЭИ имеет единственный максимум, который опережает SSC на трое суток, что совпадает по времени с началом снижения сейсмической активности. Тогда вместо магнитных бурь в качестве реперов для выбора временных окон были использованы моменты резкого повышения мощности ЭИ в радиочастотном диапазоне, и применена та же методика анализа сейсмичности. В результате оказалось, что после всплесков интенсивности ЭИ на Земле происходит резкое уменьшение количества землетрясений, которое точно совпадает с ними по времени. Сразу же после всплесков число землетрясений падает на 5% от уровня фона, а затем начинает плавно возрастать в течение 6-7 сут. Тем не менее, на протяжении 30 сут их число остается ниже уровня фона.

Проверка показала, что отмеченное уменьшение количества землетрясений статистически высоко значимо. Все это позволяет сделать вывод, что причиной подавления глобальной сейсмичности Земли являются не магнитные бури, а резкое повышение интенсивности электромагнитного излучения Солнца.

СТРАТЕГИЯ ОЦЕНКИ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ РЕГИОНА И ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Н.М. Торгаев,

ОО УК "Запсибгеология", Новокузнецк

Суть данной стратегии заключается в том, что работы по прогнозу землетрясений в сейсмоактивных регионах необходимо вести одновременно по двум направлениям: заниматься оценкой тектонической активностью региона и выявлять активные разломы с целью прогноза землетрясений. Тектоническая активность региона оценивается в результате периодических геофизических наблюдений в шахтах, глубоких карьерах или скважинах на разных уровнях от земной поверхности. Эти наблюдения позволяют оценивать текущую тектоническую активность и давать опережающий прогноз на 1-2 месяца. Подобные работы будут эффективны на островах и прибрежных зонах материков сейсмоактивных районов для прогноза цунами.

Динамические явления земной коры: оползни, горные удары, землетрясения и извержения вулканов вызываются подвижками блоков и плит в ней по активным разломам. Активные разломы оперативно выявляются по аномальным изменениям физических полей земной коры во времени, измеренных в их пределах. Напряженное состояние горных пород измеряется в относительных единицах при помощи электрометрии, гравиметрии и сейсмометрии, что позволяет определить стадию и степень тектонической активности разломов. Положение активного разлома, его размеры или размеры подвижных блоков и степень тектонической активности являются прогнозными характеристиками землетрясений: места, мощности и времени. Дальнейший мониторинг физических полей на высокоактивных разломах, в том числе измерение магнитного поля Земли, электромагнитного излучения, уровней грунтовых вод и газовых выделений позволит осуществить краткосрочный прогноз в пределах 5-и часов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ В ЛАБОРАТОРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ ПО ГИДРОРАЗРЫВУ ПЛАСТА

М.А. Тримонова, Н.А. Барышников, Е.В. Зенченко, П.Е. Зенченко, С.Б. Турунтаев

Институт динамики геосфер РАН, Москва; Trimonova.ma@gmail.com

В работе представлены результаты лабораторных экспериментов по гидроразрыву пласта с измерением поля порового давления в образце в процессе экспериментов. Лабораторный эксперимент проводился в соответствии с критериями подобия [Pater, Cleary, Quinn, 1994; Pater, Weijers, Savic, 1994]. Согласно выведенным безразмерным критериям были определены необходимые свойства образца и параметры эксперимента (модуль Юнга, коэффициент Пуассона, проницаемость, скорость закачки, вязкость флюида и т.д.).

Для удовлетворения критериям подобия в качестве модельного материала был выбран гипс с примесью портландцемента, а в качестве жидкости разрыва – вакуумное масло. С помощью экспериментальной установки исследовались образцы цилиндрической формы с диаметром 43 и высотой 7 см. Достаточно большой размер образца позволяет рассматривать не только скважину с ГРП, но и соседние скважины (добывающие и/или нагнетательные). В добывающей и нагнетательной скважинах задается постоянное давление. При проведении эксперимента, до заливки гипса, на дне установки размещаются датчики порового давления, которые позволяют замерять поровое давление в образце в течение всего эксперимента. Для лучшего понимания и представления процесса распространения трещины ГРП было проанализировано изменение порового давления в образце на всех стадиях эксперимента. Запись давления велась непрерывно: в период установления стационарного режима между добывающей и нагнетательной скважинами (до закачки жидкости разрыва), во время закачки жидкости разрыва при постоянном расходе и уже после образования трещины.

Весь процесс разделяется на три этапа, так как каждому этапу соответствует своя математическая модель. Первый этап достаточно хорошо описывается двумерной однофазной нестационарной моделью фильтрации [Азиз, Сеттари, 2004], так как образец высушивался от воды не полностью и в нагнетательную скважину закачивался насыщенный раствор гипса в воде (для предотвращения растворения материала образца). Второй этап описывается двухфазной фильтрацией - жидкость ГРП проникает в пласт и имеет вязкость, сильно отличающуюся от вязкости воды: вязкость вакуумного масла на два порядка больше вязкости воды. Этот факт позволяет рассмотреть двухфазную фильтрацию в виде поршневого вытеснения [Басниев, Кочина, Максимов, 1993]. Пока трещина не образовалась, поршневое вытеснение происходит в радиальном направлении из центра и описывается двумерной нестационарной моделью. Как только трещина начинает распространяться (третий этап), в математическую модель добавляется модель трещины, которая описывает давление в трещине и скорость ее роста. Так же учитывается тот факт, что вытеснение теперь происходит из всей трещины.

Построив математические модели фильтрации в образце, и адаптируя их к экспериментальным данным, были сделаны выводы об развитии анизотропии проницаемости вследствие образования трещины ГРП и о влиянии высоких давлений разрыва на проницаемость образца в прискважинной зоне.

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ПОРОДНОГО МАССИВА

В.А. Трофимов¹, Т.Г. Макеева², Ю.А. Филиппов¹

¹- ФГБУН Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Москва, asas_2001@mail.ru

²- ФГБУ (НИУ) Московский государственный строительный университет, Москва

Многие динамические проявления горного давления при разработке твердых полезных ископаемых и подземном строительстве протекают в режиме триггерного эффекта. Триггерный эффект – чрезвычайно быстрый переход системы из одного квазиравновесного состояния в другое под воздействием внутренних лавинообразно развертывающихся процессов. Такое преобразование начинается вследствие воздействия на систему некоторого сигнала, величина которого больше определенного минимального уровня (порога срабатывания). Минимум достаточной величины воздействующего фактора зависит от степени «напряженности» системы, которая, как правило, связана со строением и структурой самой системы. Чем ближе ее внутреннее состояние к возможному порогу устойчивого существования системы, тем ниже величина разрушающего систему фактора. Поэтому в тех случаях, когда степень «напряженности» невелика, большое влияние на процесс триггерного перехода могут оказать характер и сила сигнала.

Масштабные катастрофические разрушения в массиве горных пород при разработке твердых полезных ископаемых являются довольно редкими природными явлениями. Характерной чертой этих явлений является внезапное, скачкообразное изменение состояния в результате разрушения той или иной горнотехнической конструкции в рамках используемой системы разработки. Под землей по мере развития горных работ постепенно формируется система пустот, иногда заполненных закладкой или обрушенными породами, которая большую часть времени своего существования является устойчивой, подверженной незначительным, локальным разрушениям. В этот период параметры, описывающие ее состояние, изменяются непрерывно, без значительных скачков. Тем не менее, иногда возникают ситуации, в которых нарушается непрерывный характер изменения параметров системы, что приводит к потере устойчивости и катастрофическим разрушениям как в выработках, так и на земной поверхности. При этом, как обычно, потеря устойчивости предполагает, что при определенных условиях малому изменению параметра нагружения соответствует значительное изменение параметров, описывающих систему. В качестве иллюстрации сказанному рассматривается напряженно-деформированное состояние (НДС) борта карьера и условия его устойчивого существования. Оценка устойчивости производится с использованием подхода SSR (Shear Strength Reduction). Он основывается на численном алгоритме, в котором производится серия расчетов НДС массива, при которой на каждой итерации происходит уменьшение прочностных параметров пород массива.

Разнообразие таких параметров порождает множество вариантов метода SSR. Каждый расчет – это решение упругопластической задачи для заданных граничных условий и нагрузок на расчетную область. Эти параметры сохраняются постоянными на всех итерациях.

В качестве параметра, характеризующего прочностные свойства пород массива, была выбрана величина прочности пород на одноосное сжатие, иными словами, предел прочности на сжатие (или предел текучести). Поскольку использовалась билинейная модель пластичности (в пределе идеальная пластичность), то выбранный параметр как раз и характеризует переход от упругого деформирования к пластическому. Первая итерация производится при значении этого параметра, относящегося к изначальному состоянию массива, при котором он находится в состоянии *in situ*. Как правило, эта величина основывается на лабораторных испытаниях образцов пород, и которая входит в стандартный набор параметров, характеризующих породу. Однако в массиве эта величина значительно отличается от «кубиковой», возможно на 1÷2 порядка. В связи с этим возникает сложный вопрос, – какова же величина предела прочности (пластичности) в массиве. Именно от ее значения и будет, в конечном счете, зависеть коэффициент устойчивости горнотехнической конструкции. Последовательно уменьшая значение предела прочности при последовательных итерациях, приходим к состоянию, когда очередной численный расчет является расходящимся. То есть для этого значения предела прочности решение не существует. Иными словами, расчетные смещения ряда точек массива становятся возрастающими от итерации к итерации. В этом случае отношение начального предела прочности на первой итерации к пределу прочности для итерации с потерей сходимости и определяет коэффициент запаса устойчивости всей конструкции.

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ ВЛИЯНИЯ РОСТА ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ НА СЕЙСМИЧНОСТЬ

С.Б. Турунтаев^{1,2,3}, В.Ю. Риза^{1,2}, А.Е. Губанова³

¹ - Институт динамики геосфер РАН, Москва

² - ВНИИ Автоматики, Москва

³ - Московский физико-технический институт, Москва

Усиление сейсмической активности в районах интенсивной разработки месторождений углеводородов и строительства геотермальных электростанций является общепризнанным негативным следствием воздействия на подземные флюидные системы. Предупреждение развития катастрофических последствий в районах такого воздействия основано на использовании так называемого «светофорного» принципа: если появляются сейсмические события, магнитуда которых превышает некоторую предварительно заданную величину, включается желтый сигнал «светофора» и воздействие должно быть приостановлено; если события не прекратились, и их магнитуда растет, включается красный сигнал «светофора» и воздействие прекращается, проект должен быть закрыт. Предварительная оценка максимальной магнитуды землетрясений, индуцируемых закачкой жидкости, рядом исследователей связывается с суммарным объемом закачки. При этом за условие инициирования сейсмогенерирующей подвижки принимается достижение поровым давлением жидкости некоторой критической величины, значение которой зависит от величин главных сжимающих напряжений и ориентации естественной трещиноватости. Вместе с тем лабораторные эксперименты и натурные наблюдения показывают, что сейсмические события появляются до достижения значений давления, определяемых этим условием, а также то, что сейсмичность продолжается и после того, как достигнуто некоторое значение порового давления, причем на фоне как его повышения, так и его понижения. Имеются сведения о возрастании сейсмической активности в районе остановленного геотермального проекта спустя десять лет после прекращения закачки. Эти факты заставляют обратиться к представлениям о нелинейной реакции блочного породного массива на воздействие.

В докладе с применением методов анализа, созданных в теории нелинейных динамических систем, рассматривается ряд случаев развития техногенных сейсмических процессов в результате закачки жидкости на месторождениях углеводородов, рассматриваются результаты лабораторных экспериментов по изучению связи порового давления с сейсмическими событиями и результаты численных расчетов. В качестве модели изучаемых явлений используется многоблочная слайдер-модель, трение в которой описывается двухпараметрическим законом типа *rate-state*. Решается связанная задача об изменении порового давления в зоне разлома и изменении состояния скольжения по разлому. Рассмотрены аналитические решения уравнения пьезопроводности. Определено влияние переменных, входящих в закон трения *rate-state*, на параметры скольжения (максимальная скорость срыва, соответствующие смещения и длительность срыва), а так же на режим скольжения, определены условия возникновения хаотического режима скольжения. Показано, что, в зависимости от начальных параметров системы, набор значений величины возмущения и жесткости, приводящих к хаотическому движению, является сложно описываемым. Возмущение в виде изменения порового давления может привести к серии срывов (аналог серии сейсмических событий). При изменении параметров модели можно получить как случай быстрого роста сейсмической активности после начала закачки, так и ситуацию, когда основные сейсмические события происходят уже после окончания роста порового давления.

Полученные результаты могут быть использованы для построения реалистичных сценариев развития сейсмической активности в районах воздействия на подземные флюидные системы, объясняющие различие в откликах блочных породных массивов на рост порового давления.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

В.Н. Уваров

ИКИР ДВО РАН, Камчатский край, Елизовский р-н, пос. Паратунка; uvarovvnnng@yandex.ru

Поскольку формообразующими силами окружающего нас мира являются силы кулоновского взаимодействия, то изменение структуры макроскопических объектов (деформация) неизбежно приводит к изменению электромагнитной структуры этих объектов и появлению электромагнитного излучения, сопровождающего эти изменения. Иными словами, механоэлектромагнитные эффекты (МЭМ) — одно из фундаментальных свойств природы твердых тел. Существует довольно большой список МЭМ, сопровождающих как упругие, так и неупругие деформации [Уваров, 2016]. Следовательно, любые сейсмоакустические колебания земной коры имеют электромагнитное проявление. Иными словами, электромагнитное проявление сейсмоакустических колебаний — неотъемлемая компонента возмущений земной коры.

Следствием предложенной концепции является когерентность акустических и электромагнитных возмущений коры. Такая когерентность была обнаружена при проведении акустоэлектромагнитных исследований, выпол-

ненных на непромысловой скважине, пробуренной на термальную воду в сейсмоактивном районе Камчатки в зоне пересечения субширотного и субмеридионального разломов, приведенная на рис. 1. Фазовые сдвиги для разного типа аномалий на фигурах Лиссажу можно объяснить различием ориентаций главных векторов напряжений и деформаций в среде, а также анизотропией сопротивления среды.

Выводы: использование специализированных методов регистрации и выделения электромагнитного излучения земной коры из мощного шума атмосферно-грозового происхождения [Уваров, Дружин, Санников, 2010] позволяет регистрировать акустосейсмические колебания коры по их электромагнитному проявлению.

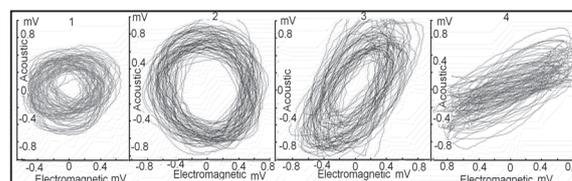


Рис. 1. Фигуры Лиссажу сейсмоакустических и электромагнитных колебаний, зарегистрированные на скважине 74 Нижне-Паратунского геотермального месторождения. Фазовые соотношения акустоэлектромагнитных аномалий разных типов. По горизонтали амплитуда электромагнитного возмущения, по вертикали — акустического

ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ СВОЙСТВ И СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ

Л.Л. Федорова, Д.В. Саввин

Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, Якутск; Lar-fed-90@rambler.ru

Строительство и эксплуатация инженерных сооружений в Якутии неизбежно приводит к деградации вечной мерзлоты, связанной с климатическими, инженерно-геологическими условиями, а также нарушениями правил ведения хозяйственной деятельности на урбанизированных территориях. Следствием техногенного влияния на вечномерзлые грунты являются просадки при увеличении глубины сезонного оттаивания, образование таликовых зон, которые приводят к пучению, заболачиванию и подтоплению [Шепелев, 2009]. Эти негативные криогенные процессы наиболее активно проявляются при эксплуатации автомобильных дорог.

В настоящее время для обследования грунтов оснований автомобильных дорог как в России, так и за рубежом успешно применяется метод георадиолокации, благодаря высокой производительности работ и детальности исследований, а также возможности производства измерений в условиях плотной городской застройки [Кулижников, 2009; Saarenketo, Scullion, 2000].

Нами проводится многолетний цикл работ по развитию метода георадиолокации для его эффективного применения при оценке состояния грунтов дорожной одежды автодорог, эксплуатируемых в криолитозоне [Fedorova, 2016]. В рамках этих работ разработана специализированная методика георадиолокации, отличающаяся проведением разносезонных измерений, позволяющих определить относительные изменения времени задержки $N_t = 100\% * (t_t - t_M) / t_t$ георадиолокационных сигналов, отраженных от границ раздела сред в мерзлом (t_M , нс) и талом (t_t , нс) состоянии грунтов. Для расчета значений влажности грунтов ($W, \%$) используется эмпирическая

формула $W = 0,65 \cdot N_i - a$, где a – коэффициент, зависящий от вещественного состава исследуемых грунтов. Так для пород второй террасы долины Туймаада, в пределах г. Якутска, $a = 1,1$. Разработан комплекс программного обеспечения, позволяющий автоматизировать процесс сбора, хранения и обработки данных георадиолокационных мониторинговых исследований [Федорова, 2016]. Выработаны интерпретационные признаки георадиолокационных волновых полей для картирования различных криогенных структур. Например, для выявления зон обводнения на границах конструктивных слоев дорожной одежды и земляного полотна, определения зон разуплотнения грунтов основания земляного полотна, выявления зон пучения грунтов. Апробация разработанных методических приемов представлена на примерах георадиолокационного обследования грунтов дорожной одежды с твердым покрытием, а также грунтовых автодорог Якутии. Результаты работ показали, что георадиолокационный мониторинг в составе инженерно-геологических изысканий позволяет обоснованно планировать и проводить мероприятия по ликвидации и предупреждению различного рода просадок и разрушений дорожных покрытий, а также оценить характер и масштабы развития негативных криогенных процессов.

ВЛИЯНИЕ АКТИВНЫХ РАЗЛОМОВ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ НЕОДНОРОДНЫХ МАССИВОВ СКАЛЬНЫХ ПОРОД

Ю.В. Федотова, Э.В. Каспарьян, Н.Н. Кузнецов

ФБГУН Горный институт КНЦ РАН, Апатиты; fjulia@mail.ru

При производстве подземных горных работ наличие разрывных нарушений и высокой напряжённости массивов пород в пределах обрабатываемых месторождений обуславливают возникновение дополнительных концентраций напряжений в элементах разработки и, как следствие, динамические проявления горного давления типа горных ударов регионального и локального происхождения. При этом зоны сопряжения разломных зон представляют собой наиболее опасные участки недр, характеризующиеся самыми высокими рисками развития опасных геодинамических процессов и явлений. Авторы развивают гипотезу об энергетической подпитке массивов пород по крупным разломам, в результате чего формируются поля напряжений с горизонтальными напряжениями, превышающими по величине вертикальные составляющие. При этом максимальные горизонтальные напряжения действуют по направлениям, перпендикулярным к контактам разломов. Именно такие разломы, по которым приходит энергия из глубоких слоёв Земли, предлагается называть активными. Дополнительными факторами, влияющими на напряженно-деформированное состояние массива горных пород, являются структурные неоднородности менее крупных рангов, представленные дайками, рудными телами, окисленными зонами и т.д. Присутствие таких неоднородностей может обуславливать изменение концентраций напряжений вблизи их границ.

В статье приводятся результаты исследований закономерностей формирования поля напряжений в неоднородном скальном массиве вблизи двух активных разломов разной конфигурации и при наличии областей неоднородностей в виде рудного тела (с меньшей жёсткостью по сравнению с вмещающими породами) и даек (с большей жёсткостью по сравнению с вмещающими породами). Исследования выполнены с помощью численного моделирования, методом конечных элементов в плоской постановке. Для моделей были выбраны условия, соответствующие обрабатываемым апатит-нефелиновым месторождениям Хибинского массива. Результаты моделирования подтвердили возможность реализации механизма энергетической подпитки массива по активным разломам и проиллюстрировали влияние неоднородностей с различными деформационными свойствами на формирование полей напряжений массива пород.

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ГОРНОСКЛАДЧАТЫХ ОБЛАСТЕЙ И ИХ ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

И.С. Фельдман

ОИВТ РАН, Москва

Представлены геоэлектрические модели земной коры горноскладчатых областей, относящихся к складчатым поясам различного возраста: докембрийского (Енисейский кряж, Забайкалье, профиль 2ДВ); палеозойского (Урал, Алтае-Саянская область); мезокайнозойского (Кавказ). Геоэлектрические разрезы представлены совместно с имеющимися данными сейсморазведки (МОГТ, ГСЗ, МОВЗ) и гравимагниторазведки.

Земная кора на всю вскрываемую эрозией и скважинами глубину состоит из метаморфизованных первично осадочных образований и интрузивных комплексов. Эти породы, характерные, по крайней мере, для верхней и средней части коры, то есть для глубин в 20-30 км, хорошо изучены как в естественном состоянии малоглубинной электроразведкой, так и в лабораторных условиях при больших температурах и давлениях. Хорошо проводящие породы из этой серии относятся к "черным сланцам", обогащенным графитом. Их сопротивление в массиве может

опускаться до долей Омм. Все остальные образования высокоомны (1000 Омм). Насыщение последних рассолами при соответствующих РТ-условиях в земной коре приводит к снижению сопротивлений на один-два порядка, но оно не может быть меньше сотен Омм. Необходимо также учесть, что в тектонически-стабильных регионах вода в земной коре находится не в свободном, а в кристаллизационно-связанном состоянии. Конечной стадией катагенеза органогенных образований является графит, который остается устойчивым в термодинамических условиях земной коры и верхов мантии. Графит может быть только растворен при процессах мигматизации (образование гранитов). Нужно добавить к этому замечательную способность углеродистых образований создавать пленочные структуры, как на микро-, так и на макроуровнях. Из общего объема органогенных образований Земли, содержащих углерод, 95% было накоплено в докембрии. Максимум приходится на средний-верхний протерозой. Малая часть из оставшихся 5% создает такие известные региональные аномалии проводимости как Южно-Тянь-Шаньская и Приенисейская. Они изучены скважинами и протягиваются на тысячи км при суммарной проводимости тысячи – десятки тысяч Омм. Поскольку основной объем земной коры сложен докембрийскими образованиями, у нас нет никаких сомнений в главенствующей роли углеродистых образований в формировании ее геоэлектрического облика.

Отметим главные особенности тектонических преобразований на примере Алтае-Саянской горно-складчатой сейсмоактивной области. Здесь первая (главная) фаза образования в процессе закрытия Палео-Тетиса выражается в виде региональных надвигов более древних пластин мощностью 7-10 км на относительно более молодые образования нижнего и среднего девона. В образовании смесителя основную роль играют черносланцевые отложения верхнепротерозойского, а возможно, и кембрийского возраста, которые слагали древние троговые структуры Урало-Монгольского пояса активизации. Возможно, что внутри этих пластин также происходило расслоение на более тонкие пластины. Девонские интрузивы сопровождали эти движения путем проникновения их в межблоковые плоскости смесителей. В последующих тектонических преобразованиях региона основную роль играли уже субвертикальные разломы, по которым происходили сдвиги блоков в горизонтальном направлении.

Анализ сейсмичности данной территории указывает на её связь с указанными выше структурными особенностями разного возраста заложения.

УЧЁТ ИЕРАРХИЧНОЙ ГЕТЕРОГЕННОСТИ ГОРНОГО МАССИВА ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ШАХТНОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ

О.А. Хачай

Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича, УрО РАН, Екатеринбург; olgakhachay@yandex.ru

Впервые явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок было описано в [Шемякин, Фисенко, Курленя и др., 1986]. Формирование структур при необратимых процессах связано с качественным скачком при достижении пороговых (критических) параметров. Самоорганизация есть сверхкритическое явление, когда параметры системы превосходят свои критические значения. Когда система отклоняется сильно от состояния равновесия, ее переменные удовлетворяют нелинейным уравнениям. Нелинейность есть важная и общая черта процессов, протекающих вдали от равновесия. При этом сверхкритическая отдача энтропии возможна лишь при наличии необычной, особой внутренней структуры системы [Эбелинг, 1979]. Это означает, что самоорганизация не является универсальным свойством материи, она существует при определенных внутренних и внешних условиях и это не связано с особым классом веществ. Итак, есть два класса необратимых процессов: 1. Разрушение структуры вблизи положения равновесия, это есть универсальное свойство систем при произвольных условиях; 2. Возникновение структур вдали от положения равновесия при условиях, что система открыта и обладает нелинейной внутренней динамикой, а ее внешние параметры имеют сверхкритические параметры. И. Пригожин назвал их диссипативными структурами [Гленсдорф, Пригожин, 1973]. Изучение морфологии и динамики миграции этих зон имеет особое значение при отработке глубокозалегающих месторождений, осложненной динамическими явлениями в виде горных ударов. Важным инструментом для этого изучения являются геофизические исследования. Как показано в [Садовский, Болховитинов, Писаренко, 1987], для описания геологической среды в виде массива горных пород с его естественной и техногенной неоднородностью следует пользоваться ее более адекватным описанием, какой является дискретная модель среды в виде кусочно-неоднородной блоковой среды с вложенными неоднородностями меньшего ранга, чем размер блока. Эта вложенность может быть прослежена несколько раз, то есть, изменив масштаб исследования, мы видим, что неоднородности меньшего ранга выступают теперь в виде блоков для неоднородностей следующего ранга. Простое усреднение измеряемых геофизических параметров может приводить к искаженным представлениям о структуре среды и ее эволюции [Садовский, Болховитинов, Писаренко, 1987].

Полученные результаты активного электромагнитного индукционного мониторинга в удароопасной шахте Таштагольского рудника позволяют сделать следующие выводы [Хачай, 2007]: - массив горных пород представляет многогранговую иерархическую структуру, изучение динамики состояния и его структуры можно вести лишь с по-

мощью геофизических методов, настроенных на такую модель среды; - использование попланшетной многоуровневой индукционной электромагнитной методики с контролируемым источником и соответствующей методики обработки и интерпретации позволило проследить два иерархических уровня и выявить зоны дезинтеграции, являющиеся индикатором устойчивости массива; - зоны дезинтеграции в околоразработочном пространстве расположены несимметрично в почве и кровле и дискретно: то есть имеются интервалы в околоразработочном пространстве полного их отсутствия; - максимальные изменения в массиве, находящемся под техногенным влиянием происходят именно в морфологии пространственного положения этих зон в зависимости от времени; - введение нового интегрального параметра поинтервального распределения интенсивности зон дезинтеграции позволяет перейти к детальной классификации массива по степени устойчивости и ввести для этого количественные критерии; - введение в систему отработки предлагаемого комплексного пассивного и активного геофизического мониторинга, нацеленного на изучение переходных процессов перераспределения напряженно-деформированного и фазового состояний, способствует предотвращению катастрофических динамических проявлений при отработке глубокозалегающих месторождений.

ФЛЮИДОДИНАМИКА МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД В ИЕРАРХИЧЕСКИХ АНОМАЛЬНО ПЛОТНОСТНЫХ, НАПРЯЖЕННЫХ, ПЛАСТИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЯХ

О.А. Хачай¹, А.Ю. Хачай²

¹ - Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича, УрО РАН, Екатеринбург; olgakhachay@yandex.ru

² - Уральский Федеральный Университет им. Первого президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург; andrey.khachay@gmail.com

Аналогии процессов нефтегазообразования и нефтегазоаккумуляции с процессами рудообразования, формирования рудных месторождений, магматизма, в которых ярко проявляется их эндогенная природа, свидетельствуют о существенной роли эндогенных факторов в процессах формирования нефтегазовых скоплений. Назрела острая необходимость рассмотрения вопросов генерации углеводородов не только в системе с органическим веществом, но и в более широких системах, охватывающих месторождения горючих ископаемых и рудные месторождения [Дмитриевский, 2009]. Процессы разработки нефтегазовых месторождений связаны с движением многофазных многокомпонентных сред, которые характеризуются неравновесными и нелинейными реологическими свойствами. Реальное поведение пластовых систем определяется сложностью реологии движущихся жидкостей и морфологического строения пористой среды, а также многообразием процессов взаимодействия между жидкостью и пористой средой. Учет этих факторов необходим для содержательного описания процессов фильтрации за счет нелинейности, неравновесности и неоднородности, присущих реальным системам. При этом выявляются новые синергетические эффекты (потеря устойчивости с возникновением колебаний, образование упорядоченных структур), а система, из которой необходимо извлечь нефть, представляет собой сложную динамическую иерархическую систему [Хасанов, Булгакова, 2003]. Для решения поставленных задач необходимо создать новую теорию моделирования и интерпретации волновых полей в рамках усложненной модели: слоистоблоковой с включениями иерархического типа.

В настоящей работе построены итерационные алгоритмы 2-D моделирования для дифракции звука и линейно поляризованной поперечной упругой волны на включении с иерархической упругой структурой, расположенной в J -ом слое N -слойной упругой среды. В отличие от работ [Хачай, Хачай, 2014; 2016; Хачай О.А., Хачай О.Ю., Хачай А.Ю., 2016] рассмотрен более сложный случай иерархичной среды. Для первого ранга плотность включения отличается от плотности вмещающей среды, а упругие параметры совпадают с упругими параметрами вмещающего слоя, для второго ранга плотность включения совпадает с плотностью вмещающей среды, а упругие параметры включения ранга отличаются от упругих параметров вмещающего слоя. Для третьего ранга параметры Ламе удовлетворяют модели Фогта. Мы использовали, как и в [Хачай, Хачай, 2014; 2016; Хачай О.А., Хачай О.Ю., Хачай А.Ю., 2016], метод интегральных и интегро-дифференциальных уравнений для пространственно-частотного представления распределения волновых полей. Из построенной теории следует, что при комплексировании акустических, геомеханических и гравитационных полей необходимо использовать такие данные, которые получены в рамках систем наблюдения, настроенных на исследование иерархической структуры среды. Использование значений плотности, полученной из корреляционной зависимости между значениями скорости продольной волны, определенной из кинематической интерпретации сейсмических данных, и плотностью, для построения плотностной модели по гравитационным данным, может привести к несоответствию этой модели с вещественным составом изучаемой геологической среды. Использование значений упругих параметров без учета аномалий плотности может привести к несоответствию геомеханической модели действующим напряжениям в геологической среде.

Построенные алгоритмы позволяют определить при заданных модулях упругости во вмещающей иерархическую неоднородность слоистой среде и дополнительных параметрах вязкости, зависящих от частоты внутренних колебаний среды включения третьего ранга пространственное распределение составляющих акустического поля на третьем иерархическом уровне. Затем по известным формулам работы для каждого иерархического уровня вы-

числить распределение составляющих тензора деформации и тензора напряжений по распределению составляющих вектора смещений, который зависит теперь не только от возбуждающей частоты, но и от частоты, определяемой внутренним трением. Взаимодействуя с возбуждающей частотой, могут происходить криповые состояния среды, либо состояния резонансного возбуждения. Эта информация играет важную роль при оценке состояния среды в зависимости от структуры ее иерархичности и степени ее изменчивости. Полученные результаты являются основой для построения новых систем картирования и мониторинга геологических систем.

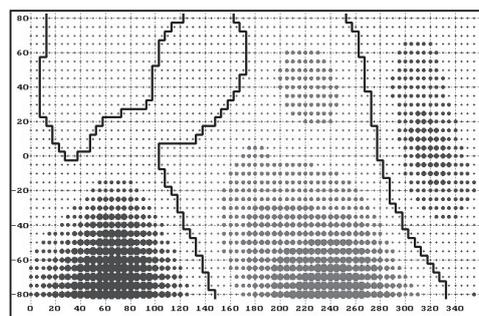
ВОЗМОЖНЫЙ ХАРАКТЕР ПЛАНЕТАРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛЫ ЛОРЕНЦА ПРИ ДВИЖЕНИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЗЕМНОЙ КОРЕ

Г.Я. Хачикян

Институт ионосферы, Алматы, Казахстан; galina.khachikyan@gmail.com

Процесс разрушения горной породы, заканчивающийся землетрясением, начинается с развития системы микротрещин [Соболев, 2016]. Одним из глобальных механизмов генерации микротрещин (планетарной трещиноватости) является неравномерность угловой скорости вращения Земли [Rebetskii, 2016], способная обусловить, в том числе «глобальный порядок» в их пространственном распределении в соответствии с планетарным распределением зон скалывания, сжатия и растяжения [Расцветаев, Тверитинова, 2016]. Возникающие позже тектонические разломы своей ориентировкой могут подстраиваться к ориентации первичной трещиноватости и, благодаря такой унаследованности направлений, тектонические разрывные дислокации могут сохранять этот глобальный порядок [Шульц, 1971]. Однако в планетарном расположении крупнейших структур литосферы и мегарельефа земной поверхности имеется ряд отклонений от ожидаемого глобального порядка, что детально обсуждалось, например, в работе [Расцветаев, Тверитинова, 2016]. Можно предположить, что в дополнение к нестабильности ротационного режима Земли параллельно действует и некая другая сила генерации планетарной трещиноватости, формирующая свой глобальный порядок. В этой связи представляют интерес заряженные частицы, которые могут рождаться как внутри земной коры, так и проникать в нее сверху (мюоны космических лучей). При движении заряженных частиц в геомагнитном поле с неизбежностью возникнет сила Лоренца, обуславливающая хоть и малые, но все-таки смещения среды в определенном направлении, определяемом геометрией магнитного поля и направлением движения заряженной частицы. В [Хачикян, Стихарная, Стихарный, Солоницына, 2007] была предпринята попытка получить (пока лишь на качественном уровне) планетарную картину распределения силы Лоренца $F_l = q [V \times B]$, где q – заряд частицы, V – вектор ее скорости, B – вектор магнитной индукции. Для примера на **Рисунке** показано планетарное распределение меридиональной компоненты (F_{lx}) для случая, когда $q = 1$, $V_x = 0$, $V_y = 0$, $V_z = 1$. Кривые – есть линии нулевого геомагнитного склонения.

В принципе, картина не выглядит абсурдной и умозрительно не трудно заключить, что современные крупнейшие структуры мегарельефа земной поверхности как бы «сгруппированы» вокруг кривых линий, где происходит изменение направления меридиональной силы Лоренца. А именно, Северная и Южная Америка примыкают к линии нулевого геомагнитного склонения в западном полушарии, а Европа, Африка, Азия и Австралия – к линии нулевого геомагнитного склонения в восточном полушарии. Характер планетарного распределения компонент F_l изменяется с изменением направления движения частиц.



ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРЕРЫВИСТЫХ СКОЛЬЖЕНИЙ НА КОНТАКТАХ БЛОКОВ ПРИ МЯГКОМ НАГРУЖЕНИИ

А.И. Чанышев, И.М. Абдулин

ИГД СО РАН, Новосибирск; a.i.chanyshhev@gmail.com

В [Курленя, Афиногенов, Жигалкин, 1998] замечено, что традиционные диаграммы упругого, упругопластического, предельного деформирования материалов отражают изменение предельной силы трения на контактах блочной модели среды (блочная модель априори неизвестна и ее по определяющим соотношениям среды в упругости с учетом первоначальной анизотропии возможно восстановить). В [Будков, Кочарян, 2016] предлагается похожая на упругость, вязкоупругость математическая модель сопротивления движению на уже готовом контакте.

В ней недостаточно полно отражены все другие классические варианты теории упругости и неупругости и в том числе не сказано, как характер шероховатости контактной площадки отражается на виде поверхности текучести, нагружения, разрушения среды.

Рассматривается сдвиг одного тела по другому. На контакте в направлении сдвига выполняется закон Ньютона: $M\ddot{x} = F - R$ (1), где M – масса сдвигаемого тела, \ddot{x} – ускорение, $F = F(t)$ – сила, вызывающая сдвиг, $R = R(x, \dot{x}, t)$ – сила, характеризующая сопротивление сдвигу или подвижке одного тела относительно другого. Кроме направления сдвига есть нормальное или ортогональное направление, вдоль которого прикладывается сила – P , притягивающая или прижимающая тела друг к другу в процессе их сдвига (считаем, что она меняется незначительно). Поскольку (1) – дифференциальное уравнение второго порядка, то в общем случае сопротивление R должно зависеть от трех параметров. То, что R может зависеть от t , расценивается как возможность учета старения сопротивления R со временем, зависимость от \dot{x} позволяет учесть вязкость, зависимость R от x определяется сухим трением. Поскольку сила P не меняется в процессе сдвига, поэтому изменяется коэффициент трения. На рис. 1, а представлена схематично возможная зависимость R от x (или, что тоже самое, коэффициента трения от x).

В связи с (1) возникают вопросы. Первый, как из (1) определить паспортную зависимость контактной площадки $R = R(x, \dot{x}, t)$? Решение очевидное – требуется провести такое нагружение за счет $F(t)$, при котором $\ddot{x} = 0$. Тогда из (1) следует, что $F = R$. Поскольку силу F возможно измерять, то отсюда из экспериментов находится сопротивление $R = R(x, \dot{x}, t)$. Для этого необходимо еще варьировать значения скорости $\dot{x} = \text{const}$. Другой вопрос. При известной зависимости $R = R(x, \dot{x}, t)$ уравнение (1) служит для определения зависимости $x = x(t)$. Какого вида зависимости при этом могут быть? На участке упругости (OA) рис. 1, а решением (1) при условии $F = at$, $R = \lambda x$ будет прямая $x = at/\lambda$ с высокочастотными колебаниями, на участке пластичности (AB) частота колебаний уменьшится, амплитуда возрастет. На участке разрушения (BC) в силу несовпадения значений F и R произойдет экспоненциальный рост скоростей и смещений. Для наглядности все зависимости построены для конкретных значений наклонов отрезков OA, AB, BC к оси абсцисс, начальных данных. Приводятся сравнения с результатами лабораторных экспериментов, имеющихся в литературе. Далее после срыва процесс скольжения может прекратиться, продолжиться с преодолением трения, представленного фигурами $OABC, CDEF, FGHK$ на рис. 1, а в следствие вовлечения в процесс скольжения фрагментов разрушенной породы вплоть до образования зеркал скольжения. На рис. 1, б представлен пример деформирования с продолжением, когда сжимается образец горной породы между опорными плитами пресса. В начале деформируется и разрушается сам образец (фигура $OABC$ на рис. 1, а), затем под продолжающимся движением плит начинают деформироваться и разрушаться куски разрушенного образца и т.д., так, как показано на диаграммах $CDEF, FGHK$ рис. 1, а.

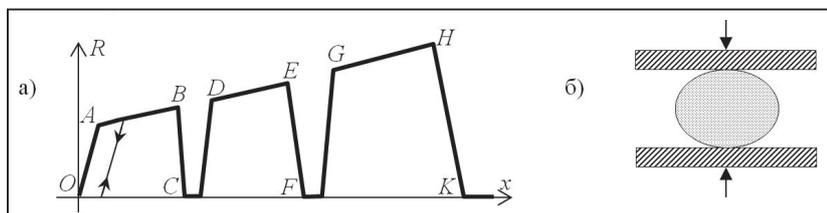


Рис. 1. а) зависимость ($R = R(x)$, совпадающая по характеру с изменением значения коэффициента трения на контакте одного тела с другим; б) деформирование и разрушение материала между опорными плитами пресса

Вывод. Коэффициент трения на контактных площадках блоков изменяется аналогично диаграмме деформирования $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ материалов (горных пород), где роль σ играет коэффициент трения, роль ε – относительное смещение. Различным участкам этой диаграммы соответствуют определенные зависимости $x = x(t)$, $F = F(x)$, анализ которых позволяет контролировать степень сдвига одного блока по другому. Диаграмма $F = F(x)$ при этом не совпадает в общем случае с диаграммой изменения $R = R(x)$.

РАЗЛОМНЫЕ ЗОНЫ ЦЕНТРАЛЬНОГО ПРИБАЙКАЛЬЯ: ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ

А.В. Черемных

Институт земной коры СО РАН, Иркутск; cherem@crust.irk.ru

Прибайкалье охватывает область соприкосновения Сибирской платформы и Центрально-Азиатского складчатого пояса. На этой территории известно неоднократное проявление тектонических процессов, в результате которых сформировались основные разломы региона. Многими исследователями выделяются палеозойский и мезозойский этапы надвигообразования [Александров, 1990], позднепалеозойский сдвиговый этап [Федоровский, 1997] и кайнозойское рифтообразование, в рамках которого выделяют ранне- и позднеорогенный этапы, отличающиеся кинематическим типом разломов – сдвиги и сбросы соответственно.

Исследование внутренней структуры дизъюнктивов Центрального Прибайкалья позволило на новом уровне

рассмотреть последовательность этапов тектогенеза и специфику активизации разрывов в пределах разломных зон. Оно проведено на основе структурно-парагенетического анализа дизъюнктивных дислокаций нескольких рангов [Семинский, 2014]. Детальные исследования разрывов и трещиноватости в окрестностях разломных зон Приольхонья выявили специфику их активизации, при которой каждый последующий этап деформации охватывал все более узкую область [Черемных, 2015]. Это связано как с последовательностью этапов деформации (сжатие, сдвиг, растяжение), так и со спецификой деструктивного процесса, начавшегося в «сплошной» среде, а затем развивающегося в среде нарушенной разломами, находящимися на разных стадиях развития. Последующий поранговый структурно-парагенетический анализ, проведенный для зон основных разломов района [Delvaux, Moyes, Stapel et al., 1997] позволил установить наиболее проявленную региональную тектоническую обстановку (растяжение), а также обстановки с меньшим количеством решений (сдвиг и сжатие).

Полученные выводы были верифицированы на основе структурно-парагенетического анализа линейаментов, откартированных при морфоструктурном районировании в районе Бугульдейского дизъюнктивного узла. Изучены локальные линейаменты двух типов - хорошо и слабо выраженные в рельефе, а также региональные зоны концентрации линейных форм рельефа, соответствующие разломам. Парагенетический анализ структурных рисунков линейаментов в пределах разломных зон позволил реконструировать морфолого-кинематические типы региональных дизъюнктивов. Внутренняя структура изученных разломов сформировалась в результате двух этапов: более раннего сжатия и последующего растяжения с СЗ-ЮВ ориентировкой осей главных напряжений. Растяжение активизировало зоны разломов и не затронуло блоки, в пределах которых реконструированы обстановки сдвига и сжатия. *Некоторые виды представленных исследований выполнены при поддержке РФФИ (проект № 16-05-00154).*

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ГЛУБИННЫХ ЗОН ЛИТОСФЕРЫ ЯПОНСКОГО МОРЯ И ИХ СВЯЗЬ С СЕЙСМИЧНОСТЬЮ РЕГИОНА

А.Г. Черников

Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Москва; agchernikov@mail.ru

Определение координат гипоцентров землетрясений относится к числу обратных кинематических задач и является одной из основных проблем при проведении сейсмораионирования, сейсмотектоники, инженерной сейсмологии, предсказания землетрясений и глубинных сейсмических исследований. Реализованная на о. Сахалин система сбора, передачи, хранения и обработки данных о произошедших землетрясениях определяет параметры очага: широты ($\Delta\varphi$), долготы ($\Delta\lambda$) эпицентра и глубины (ΔH). Установленная погрешность положения гипоцентра для 80% зарегистрированных в регионе событий не превышает 10 км. [Назарова, 2006] Однако для остальных 20% событий расхождения оценок могут в разы превышать установленные значения величины погрешности, так как глубина очага принимается либо известной, априори, так называемая эквивалентная глубина (наиболее вероятная глубина очага в районе возникновения землетрясения), либо решается "некорректная" задача одновременного определения координат гипоцентров землетрясений и оценки скоростного разреза среды при малом объеме наблюдений.

Нами, был разработан способ оперативного прогнозирования подповерхностного строения и свойств разномасштабных геологических объектов на основании обработки результатов измерения поверхностных геолого-геофизических полей различного генезиса [Черников, Матушкин, Либина, 2001; Либина, Черников, 2013]. Способ, математической основой которой является теория конечных цепей Маркова, базируется на положении о вероятностном наследовании марковских свойств глубинных отложений, в марковских свойствах перекрывающих наслоений. Прогностическая 3D-модель строения и свойств (в том числе скорости продольных волн) подповерхностных отложений рассчитывается при решении обратной задачи путем компьютерного анализа марковских свойств геолого-геофизических полей, измеренных на поверхности горного массива. Способом "Марковской томографии" была рассчитана скоростная 3D-модель Японского моря на глубину 67 километров от поверхности дна в акватории и на прилегающей суше, в прямоугольнике с координатами: 30-45° с.ш. и 125-150° в.д. Используя 3D модель глубинных отложений Японского моря, были рассчитаны (попарно) томограммы ортогонально пересекающие гипоцентры произошедших в последние годы крупных землетрясений, в том числе и "Великое" Японское землетрясение 11.03.2011. Также была рассчитана, по данным каталога землетрясений в Японском море, сомасштабная 3D модель распределения гипоцентров землетрясений. Наложение томограмм землетрясений на скоростные томограммы позволяет получить наглядные отображения, связывающие геологическое строение глубинного массива с вероятностной моделью пространственного распределения очагов землетрясений.

В докладе представлены принципы марковского прогнозирования глубинного строения подповерхностных отложений, архитектура программно-методического комплекса, томографическая модель Японского моря и сопоставимые геолого-сейсмологические модели.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОГО МАССИВА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭНТРОПИЙНОГО АНАЛИЗА ИЗМЕРЯЕМЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

А.Г. Черников¹, Е.В. Федоров¹, Н.В. Либина²

¹ - Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Москва; agchernikov@mail.ru

² - Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Реальные природные системы формируют как пространственные, так и временные структуры. Пространственные структуры обычно изучаются путем анализа пространственного распределения свойств объектов (прогноз), а временные путем анализа их изменчивости во времени (мониторинг). Одним из эффективных методов исследования подобных систем является вероятностная оценка степени хаотичности (упорядоченности) распределения составляющих их подсистем, а универсальным инструментом для его реализации является «формальный» метод безгипотезного поиска - энтропийный анализ. Понимание универсальности энтропии как меры хаотичности, независимой от природы исследуемой системы, вошло в научный оборот постепенно. Как мера хаоса, энтропия обосновалась в науках о системах различной природы: в термодинамике - энтропия Клаузиуса, статистической физике - Больцмана, квантовой механике - фон Неймана, а в теории информации - Шеннона. Применительно к моделям геологических систем, сущность информационной энтропии, заключается в количественной оценке меры пространственно-временной изменчивости элементов систем, позволяющей отождествить их с предпочтительным направлением развития системы на шкале событий от затухания до катастрофы. В теории информации энтропия — мера неопределенности какого-либо опыта (испытания), который, в зависимости от случая, может заканчиваться различными исходами. При этом предполагают, что имеются определенные вероятности появления того или иного исхода. Пусть $x_1, x_2 \dots x_n$ — различные исходы опыта, $p_1, p_2 \dots p_n$ — соответствующие вероятности, $p_i \geq 0$, $\sum p_i = 1$. Тогда, формально, информационная энтропия (мера информации по К. Шеннону) определяется выражением: $H = H(p_1, p_2 \dots p_n) = -\sum p_i \log_2(1/p_i)$ (считается, что $0 \log 0 = 0$). (1)

Свойства этой меры таковы, что энтропия равна нулю в том случае, когда одна из вероятностей p_i равна единице, а остальные равны нулю, то есть, когда результат опыта достоверен. А достигает максимального значения энтропия, при данном n , в случае, когда все исходы равновероятны, то есть геологическая система не выражает каких-либо предпочтений в своем поведении. Важно учитывать, что приведенная формула (1) всего лишь алгоритм для расчета величины H . Смысл и значения этой величины, а также граф счетной операции, целиком определяются обозначенными границами области распространения системы объекта, требованиями к дискретности получаемой оценки и характеристиками её покрытия. [Николис, 1990]. В качестве "покрытия" выступает "геологическое поле", являющееся равномерно распределенным в пространстве или на плоскости свойством, присущим исследуемому объекту и адекватным его потенциальным трансформациям. Пропуская подготовленное для расчета поле через цифровой фильтр, представляющий собой алгоритм, основанный на разделении свойств элементов системы на уровни информационной энтропии, удается усилить информационную контрастность частей объекта. Выбор параметров фильтра осуществляется путем подбора величины дискрета (единичной площади) и размера окружающего пространства, в пределах которого рассчитывается оценка для единичной площадки. Шенноновская энтропия показывает потенциальный информационный уровень элементов системы, выявляя те из них, вероятность активизации которых существенно выше, чем в окружающих их подсистемах. В докладе приводятся примеры 2- и 3D-прогнозирования состояния геосистем различного генезиса по результатам информационно-энтропийного анализа их свойств, с использованием математического аппарата конечных цепей Маркова. [Вистелиус, 1980].

ПРОБЛЕМЫ 3D ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГИБОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ

А.Н. Четырбоцкий

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток; chetyrbotsky@yandex.ru

Анализ рельефа рассматриваемой поверхности Земли позволяет при определенной степени точности выполнить реконструкцию динамики ряда геодинамических процессов. В частности, если принимается допущение о представлении коры Земли некоторым слоем, то на основании аппарата механики сплошной среды (МСС) можно оценить его напряженно деформированное состояние (НДС). В практике геофизических исследований для этого используются трехмерные уравнения Навье-Стокса. В [Дядьков, Назаров, Назарова, 2006] они используются для 3D моделирования НДС литосферы Центральной Азии, а их стационарный вариант (уравнение Стокса) — движения плит [Четырбоцкий, 2009]. Подобная ситуация отмечается также для оценки состояния ледяного покрова замерзающих морей [Lithgow-Bertelloni, Richards, 1998]. Для оценки НДС земной коры представляется

уместным ограничиться указанием распределения прогибов среды и положениями Кирхгофа-Лява. В этой ситуации 3D вычисления сводятся к 2D вычислениям, что существенным образом снижает требуемые для решения задач вычислительные ресурсы. При заданных плотностях $\rho(x, y, t)$ и толщинах $h(x, y, t)$ уравнение модели принимает вид [Кулешов, 2005]:

$$\rho h S_t = M_x S_{xx} - 2M_{xy} S_{xy} + M_{yy} S_{yy} - aW + F \quad M_{x,t} = -D S_{xx} - m D S_{yy} \quad M_{y,t} = -D S_{xx} - D S_{yy} \quad W_t = S$$

где $S(x, y, t)$ плотность, толщина слоя и скорость изменения прогиба; M_x, M_y, M_{xy} - изгибающие и крутящий момент; a - так называемый параметр постели; F - сила внешнего воздействия; $D = Eh^3/12(1 - m^2)$ - цилиндрическая жесткость; E, m - модуль Юнга и коэффициент Пуассона. Начальные условия следуют соотношениям:

$$W_{t=0} = j, S_{t=0} = y, M_x|_{t=0} = -D(j_{xx} + m j_{yy}), M_y|_{t=0} = -D(m j_{xx} + j_{yy})$$

где функция $j(x, y)$ и $y(x, y)$ определяют начальное состояние системы. Постановка граничных условий конкретизирует конкретные случаи.

О ПРИРОДЕ СЕЙСМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССА ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Е.Б. Чирков

ИФЗ РАН, Москва; ye_chirkov@list.ru

Несмотря на то, что краткосрочный прогноз землетрясений представляет собой насущную проблему для всего человечества, многолетние исследования в этом направлении не привели к успеху в её решении. Вызвано ли это неразрешимостью проблемы краткосрочного прогноза или её неразрешимостью в рамках нашего подхода к проблеме? Можно привести довольно веские доводы в пользу второй гипотезы. Во-первых, мы беремся решать задачу прогноза предположив, что существует безусловная связь между единичным проявлением предвестника и характеристиками землетрясения, хотя вполне возможно, что для предсказания характеристик землетрясения необходимо контролировать временной ход процесса подготовки в пространстве. Во-вторых, мы беремся за эту задачу, не зная толком природы предвестниковых сигналов, не имея априорного критерия для их выделения, не имея надёжных опытных сведений ни о динамике процесса подготовки землетрясения (который связывает землетрясение и предполагаемый предвестник), ни о влиянии, которое оказывает на процесс подготовки тектоническое строение региона. По нашему мнению, возможность краткосрочного прогноза определяется существованием процесса подготовки землетрясения и нашей способностью контролировать ход этого процесса, проявляющегося в вариациях НДС. Настоящим объектом исследования является сам процесс подготовки землетрясения и для его изучения нужны не мистические предвестники, а средства экономичного контроля вариаций НДС больших объёмов сложно-построенной среды.

Мониторинг сейсмоэлектрических сигналов (SES) является одним из кандидатов в комплекс методов для контроля вариаций НДС, потенциально представляя собой недорогой и робастный метод полуконтрольного контроля малых вариаций НДС для участков размерами в несколько сотен метров. Для превращения потенциальных возможностей метода в реальные необходимо понять природу сейсмоэлектрических сигналов, повысить информативность образа аномалии и полностью формализовать обработку результатов измерений, чтобы исключить влияние субъективного фактора. Данная работа представляет собой продвижение по этим трем взаимосвязанным направлениям на основе анализа ограниченного объёма данных мониторинга по методике профессора Варотсоса (проводившегося на станции Карымшино совместно с японскими коллегами), любезно предоставленных мне покойным Олегом Александровичем Молчановым.

В работе впервые реализована методика аккуратного формализованного выделения большого числа локальных источников на измерительной установке профессора Варотсоса, благодаря которой для нескольких десятков источников получены косвенные свидетельства генерации сигналов трещинами и надёжные оценки распределений амплитуд сигналов и интервалов между ними. Это позволило существенно увеличить информативность и достоверность образа аномалии и на качественно новом уровне подойти к исследованию характера генерации источников сигнала и проблеме выделения информационного параметра наиболее тесно связанного с вариацией НДС.

О ВОЗМОЖНОСТИ МОНИТОРИНГА ВАРИАЦИЙ ЛОКАЛЬНОЙ НДС НА ОСНОВЕ НАБЛЮДЕНИЙ КАЖУЩЕГОСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В ВОДОНАСЫЩЕННОЙ СКВАЖИНЕ

Е.Б. Чирков¹, Е.Б., И.Ш. Идармачев²

¹ - ИФЗ РАН, Москва; ye_chirkov@list.ru

Предложена физическая модель, описывающая механизм воздействия уровня воды в скважине, её температуры и минерализации, атмосферного давления и локальных вариаций НДС на величину измеряемого кажущегося сопротивления.

На основе анализа данных более чем трехлетнего интервала наблюдения кажущегося сопротивления, атмосферного давления, уровня воды и температуры воды в скважине в районе Чиркейской ГЭС показана адекватность модели и возможность реализации метода контроля локальных вариаций НДС при дополнительном измерении электросопротивления воды. Для анализа данных использован метод главных компонент (МГК), правомочность применения которого и устойчивость полученных результатов показана для рядов данных после исключения влияния вариаций температуры воды на кажущееся сопротивление и вариаций уровня воды на геоэлектрическую модель. Метод МГК использован не для снижения размерности данных, а для формализованного разделения наблюдаемого ряда кажущегося сопротивления на независимые компоненты с целью выделения малых компонент перспективных для поиска аномалий, связанных с вариациями НДС.

На основе анализа наборов измеренных величин, входящих в компоненты МГК, и их поведения во временной и частотных областях, предложена физическая интерпретация компонент. Показано, что для исходных данных годовая периодичность присутствует во всех измеренных характеристиках, а в кажущемся сопротивлении присутствуют частотные составляющие общие с уровнем воды, минерализацией воды и атмосферным давлением.

После выделения четырех компонент, описывающих 100% дисперсии рядов измеренных данных, годовая периодичность присутствует только в первых двух, обусловленных влиянием вариаций уровня водохранилища и атмосферного давления. Две другие компоненты, преимущественно связанные с влиянием вариаций минерализации воды и локальной вариации НДС потенциально могут содержать сигналы предвестниковой природы, для выделения которых предложена формализованная технология, основанная на МГК и использовании законов распределения компонент. На основе сопоставления результатов, полученных с помощью данной технологии, с рассчитанной по теории И.П. Добровольского объемной деформацией в пункте наблюдения от местных землетрясений, сделан вывод о перспективности данного подхода.

РОЛЬ ПРИЛИВНЫХ СИЛ КАК ТРИГГЕРА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, КЛАСТЕРИЗИРОВАННЫХ ПО ШИРОТАМ

Д.Л. Чубаров

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Изучение механизмов возникновения землетрясений - одно из наиболее актуальных направлений исследований в области геофизики. Одним из таких механизмов может быть воздействие приливных сил со стороны Солнца и Луны. Исследования, посвященные поиску взаимосвязи между сейсмологическими событиями и приливными силами, ведутся с конца XIX века как зарубежными, так и российскими исследователями. Анализируя подходы различных исследователей, можно четко выделить три варианта направленности работ: исследование одного конкретного землетрясения [Crockett, Gillmore, Phillips, Gilbertson, 2006], исследование землетрясений определенного региона [Tamrazyan, 1967] и исследование определенного количества землетрясений по всему миру.

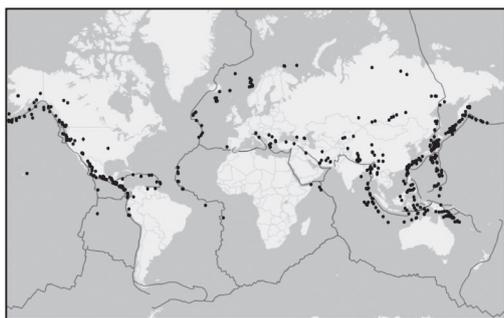


Рис. 1. Землетрясения, выбранные для

Так же, довольно широкую область покрывают исследования, направленные на изучение взаимосвязи между приливными силами и малоамплитудными сейсмическими событиями [Adushkin, Spivak, Kharlamov, 2012].

Цель данного исследования - проанализировать возможность выступления приливных сил в качестве триггера для землетрясений, кластеризированных по широтам. Объектом исследований стали 700 событий, разделенные на 7 широтных поясов (рис. 1). Для каждого из поясов была проведена оценка корреляции между временем землетрясения и значением горизонтальной и вертикальной компонент приливных сил.

СИЛЬНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ: ЛОКАЛИЗАЦИЯ, ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ОЧАГОВ

С.И. Шерман, Е.А. Горбунова

Институт земной коры СО РАН, Иркутск; ssherman@crust.irk.ru

1. Сильные землетрясения континентальной Центральной Азии текущего столетия нами классифицированы на две группы: $7 \geq M > 8$ и $M \geq 8$. Локализация последних четко образует пространственный кластер, ограниченный неправильной трапецией [Шерман, 2015]. События с $M \geq 8$: 1). Локализируются в активной геодинамической зоне со стабильным высоким напряженным состоянием коры с областями течения материала; 2). Контролируются крупными разломами со значительным сдвигом и сложной внутренней структурой; 3). Локализируются в областях с толщиной земной коры до 70 км; 4). Характеризуются гипоцентрами, тяготеющими к глубинам до 50 км.

2. Сила очага землетрясения в системе СИ оценивается сейсмическим моментом $M_0 = \mu SD$ дин/см (1), где μ – сопротивление среды на сдвиг в межблоковой среде, дин/см²; S – площадь сдвигающихся пограничных блоков, см²; D – амплитуда смещения, см [Аки, 1966; Ризниченко, 1985]. Уравнение предусматривает сдвиг в межблоковой среде очага землетрясения, которая рассматривается как достаточно упругая.

3. Внутренняя структура сейсмоактивных разломов, вмещающих очаги землетрясений, представлена зонами повышенной трещиноватости, обломочными и будинажными образованиями, а также различными формами течения материалов. Её прочностные свойства предопределяет не столько пестрый петрографический состав среды, сколько размеры отдельных структурных формирований её образующих и прочность их сцеплений [Qi, Naohiang, Bai, Qi, Li, 2016]. Чем мельче структурные формирования, тем ниже их динамическая вязкость/квазивязкость, и, следовательно, сопротивление сдвиговым деформациям. Реакция же вязкой среды на скорости её деформирования не однозначна и определяется числом Деборы (Deborah): $D_e = \tau/t_{load}$ (2), где τ – время релаксации, t_{load} – время нагружения или наблюдения процесса [Асарита, Маруччи, 1978], изменяющимся от $\gg 1$ до $\ll 1$, от упругого тела до жидкого. В рассматриваемых нами условиях $D_e \sim 1$: деформируемая среда отвечает вариациями свойств вязкого тела. Физические параметры межблоковых разломных зон, где формируются очаги сильных и сильнейших землетрясений, характеризуются сложными реологическими свойствами, и не всегда соответствуют μ в ур.(1), определяющим величину сопротивления сдвигу в упругой среде. Изложенное позволяет написать ур. (1) в измененной форме $M_0 = \eta(\dot{\gamma}, l) \cdot SD$ ГПа·м²·м (3) в системе СИ, где η – динамическая вязкость (ГПа), отражающая отклик среды на скорости деформирования ($\dot{\gamma}$) и размеры (l) структурных формирований в зоне разлома.

4. Введение параметра вязкости в среду очага сильного землетрясения позволяет учитывать изменения свойств межблоковой реологической среды в диапазонах ее структурных элементов, их релаксационных свойств, времени действия нагрузки и других физических параметров. Очаг в вязкой среде межблоковой зоны развивается медленно, пропорционально превалированию сдвиговых девиаторных напряжений над всесторонним давлением. По мере изменения соотношений напряжений среда переходит из вязко-упругого в упруговязкое, низковязкое или другие состояния [Mogi, 1966]. Снижение вязкости ослабляет прочностные свойства очага, происходит высокоамплитудный сдвиг, с большой вероятностью переходящий в скольжение [Кочарян, 2017].

Вариации свойств вязкой среды в очагах сильных землетрясений во время их формирования – основная причина больших сдвигов и высоких значений M_0 . Введение параметра вязкости в свойства среды очага облегчает прогноз сильных землетрясений.

ЕДИНЫЙ МЕХАНИЗМ ДИНАМИЧЕСКИХ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ

А.В. Шестопалов

ИПКОН РАН, Москва; sinergo@mail.ru

Большие глубины, по моему мнению, это такие глубины на которых начинает проявляться зона отжима в краевой части горного массива. Это такие трещины, о которых знают все, но никто их не видел (экспериментально установить не возможно). Так же все согласны с тем, что образец угля в лаборатории и угольное вещество глубоко под землей - это не одно и тоже. Тем не менее, все продолжают исследовать образцы и присваивать, установленные в лаборатории, свойства и закономерности разрабатываемым угольным пластам. Я буду излагать материал на примере угля, имея в виду, что все мои умозаключения в той же степени справедливы для любого минерала, руды и горной породы на соответствующих им больших глубинах. При этом не залегания, а разработки, так как для протекания динамических (ДЯ) и газодинамических (ГДЯ) процессов (явлений) необходима поверхность обнажения. ДЯ – это горный удар, внезапное обрушение пород кровли, внезапное поднятие пород кровли, внезапное высыпание угля и т.п. без газовыделения. ГДЯ – это внезапные выбросы угля, породы и газа, внезапное поднятие пород почвы с повышенным газовыделением, внезапное высыпание угля с повышенным газовыделением и т.п. Проблеме борьбы с ДЯ и ГДЯ более ста лет потому, что исследователи рассматривают каждое явление в отдельности, не связывая это с механизмом формирования зоны отжима, который «экспериментально установить не возможно».

Более тридцати лет назад эта проблема была решена мною на феноменологическом уровне путем выдвижения гипотезы самоорганизации дендритоподобных трещин в краевой части разрабатываемого горного массива на больших глубинах. При этом, в соответствии с синергетическими представлениями этот процесс может протекать в двух режимах - квазистационарном и в режиме с обострением, то есть в виде обычного отжима и в виде взрывопо-

добного разрушения. Предложенный мною в те годы термин «процессовый фрактал» предполагал, что из горной выработки вглубь массива прорастает «секущая» трещина, которая ветвится на трещины «расслоения». Трещины расслоения в свою очередь ветвятся на «секущие» трещины, образуя систему трещин, напоминающую дерево. При этом все «веточки» этой системы соединены со «стволом» и горной выработкой. Доказательство гипотезы какими либо прямыми шахтными экспериментами было не возможно ни тогда, ни сегодня. Зона разупрочнения (отжима), не являясь ископаемым углем или горной породой, делает недоступным ископаемый горный массив для прямого изучения. Однако гипотеза давала понимание причины ДЯ и ГДЯ (управляющих параметров) и подтверждалась опытом ведения горных работ, что позволило разработать абсолютно безопасные технологии разработки удароопасных и выбросоопасных угольных пластов. Разработанная на основе гипотезы математическая модель ДЯ и ГДЯ представляет собой классический (неподвижный) клеточный автомат, в котором состояние клетки определяется состоянием соседних клеток. При этом численными методами многократно решаются уравнение Лапласа для квазистационарного режима или уравнение Пуассона для режима с обострением. Режим с обострением возникает в результате появления обратной положительной связи в виде: а) веса разупрочненной породы или угля; б) рождения дислокаций на острие растущей трещины; в) генерации газа острием растущей трещины. Соответственно, при: а) внезапном обрушении или высыпании; б) горном ударе; в) внезапном выбросе угля, породы и газа. Таким образом, есть решение проблемы борьбы с ДЯ и ГДЯ, которое более ста раз опубликовано в материалах различных конференций и которое, по моему мнению, нужно развивать.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ РАЗРЫВА ПО РАЗЛОМУ ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ

М.И. Шимелевич¹, Е.А. Оборнев¹, И.С. Фельдман², В.А. Новиков²

¹- Российский государственный геологоразведочный университет, Москва; eugenyo@mail.ru

²- Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

Разработана двумерная (2D) геоэлектрическая модель гетерогенной геосреды с учетом представления о процессах, происходящих в геологическом объекте типа флексура, которая в результате деформаций превращается во взбросо-надвиговую структуру. В основу модели положена гипотеза об изменении проводимости геоматериалов в локальной зоне разлома в субкритическом напряженно-деформированном состоянии вследствие геодинимических процессов [Шимелевич, Оборнев, Гаврюшов, 2003]. В области максимума сдвигового напряжения на плоскости разрыва взбросо-надвигового типа развивается зона повышенной трещиноватости, способствующей существенному уменьшению сопротивления за счёт заполнения трещин флюидом - так называемая «проводящая щель». В результате численного моделирования показано, что при переходе от квазислоистой модели к двумерной с высокоомным экраном перераспределение плотности полного тока в среде, с учетом предполагаемых представлений о формировании зоны трещиноватости, существенно увеличивается за счёт эффекта «проводящей щели». При этом амплитуда электромагнитного (ЭМ) поля для продольной поляризации возрастает на большом удалении от зоны «проводящей щели».

Полученный результат может являться основанием для разработки методики мониторинга ЭМ-полей [Шимелевич, Оборнев, 2005; Shimelevich, Osborne, Gavryushov, 2007], измеряемых на поверхности Земли на удалении от очага землетрясения и непосредственно над разломом, с целью контроля степени готовности разлома к возникновению сейсмического события.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЕДИНОЙ МОДЕЛИ КОРОВОГО, ПРОМЕЖУТОЧНОГО, ГЛУБОКОФОКУСНОГО И МЕДЛЕННОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

С.А. Шопин^{1,2}, А.А. Протопопов², Л.Н. Дода², В.А. Ерофеев², В.Л. Натяганов³

¹— ООО «Тульская геологоразведочная партия», Тула; sshopin@tulgrp.ru

²— Тульский государственный университет

³— Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

В работах [Соболев, Пономарев, 2003; Дода, Натяганов, Степанов, 2013] показано, что существует взаимосвязь между геомагнитными возмущениями и сейсмичностью. Данная связь обнаружена статистически и в рамках общепринятых подходов механики разрушения неясны конкретные физические механизмы, обеспечивающие ее реализацию. Ввиду того, что отсутствуют физические соотношения между электромагнитными процессами и параметрами, используемыми в механике разрушения, указанная взаимосвязь может реализовываться только через сложные физические и физико-химические процессы. Предполагается, что центральную роль при этом играет глубинная дегазация, в первую очередь, водородная. В работе рассматриваются физические основы единой модели различных видов сейсмических

событий как обычных (корового, промежуточного, глубокофокусного), так и медленного и тихого землетрясений. Горные породы в области подготовки землетрясения рассматриваются в виде частично аморфизированного, флюидо- и газонасыщенного композита. В качестве упругого тела рассматривается сжатый газ, преимущественно водород, находящийся в полостях композита. Схлопывание газовой полости вызывает деформацию матрицы композита, которая управляется упругим поведением сжатого газа. Данная деформация обуславливает псевдоупругую отдачу среды. Показано, что высвобождаемая при этом удельная энергия соответствует оценкам удельной энергии, накопленной в месте подготовки землетрясения.

Получено эмпирическое уравнение для оценки содержания водорода в литосфере и мантии. Показано, что для инициации процесса схлопывания газовых пузырей достаточно обеспечить дополнительную концентрацию водорода, значительно меньшую, чем уже присутствует в среде (триггерный эффект!). В качестве физического процесса, обеспечивающего генерацию дополнительной концентрации водорода, рассматривается электролиз глубинных флюидов токами, индуцированными в литосфере геомагнитными возмущениями. Выполнено имитационное моделирование индуцирования электрических токов в литосфере и верхней мантии при магнитной буре, обуславливающих электролиз флюида. Показано, что вследствие электролиза возможна генерация необходимой дополнительной концентрации водорода. Предложен механизм образования водородонаполненных полостей как аналога физических процессов при образовании флокенов и холодных трещин в стали в виде диффузионного насоса с образованием молекулярного водорода из мигрирующих в среде протонов. Показано, что энергетика физико-химических процессов соответствует энергии, накапливаемой в областях подготовки землетрясений.

АМПЛИТУДЫ И ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ МАСШТАБЫ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПРОИЗВОДНЫХ ПО ВРЕМЕНИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Н.В. Ягова¹, В.А. Пилипенко^{1,2}, О.В. Козырева¹, Е.Н. Федоров¹, А.Д. Лхамдондог³, Ю.П. Гусев³

¹ - ИФЗ РАН, Москва

² - НИУ МЭИ, Москва

³ - ИКИ РАН, Москва

По данным наблюдений геомагнитного поля на станциях сети IMAGE и INTERMAGNET на разных фазах цикла солнечной активности изучены пространственные и временные масштабы экстремальных значений производных по времени горизонтальных компонент геомагнитного поля, представляющих потенциальную опасность для промышленных электрических сетей за счет возбуждения геоиндуцированных токов (ГИТ). Исследованы возмущения, возникающие при разных типах геомагнитных возмущений – от супербурь до локальных возмущений, возникающих вне бури за счет наложения магнитосферной суббури и геомагнитных пульсаций большой амплитуды. Обсуждаются частоты возникновения и возможность прогноза экстремальных возмущений, потенциально опасных для промышленных электрических сетей. Проведены первоначальные оценки для долговременного прогноза (аналога сейсмического районирования) для возбуждения геоиндуцированных токов на территории Российской Федерации.

МОНИТОРИНГ СЛАБОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ БАСЕЙНА КУРСКОЙ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ

А.Н. Беседина

Институт динамики геосфер РАН, Москва; besedina.a@gmail.com

Сейсмологический мониторинг является общепринятым инструментом для контроля деформационных процессов в массивах горных пород. Хотя сейсмичность в платформенных условиях представлена главным образом карьерными взрывами, а также слабыми событиями эндогенной и экзогенной природы, в последнее десятилетие на территории Восточно-Европейской платформы произошли четыре значимых землетрясения с магнитудами от 4.0 до 4.8. При этом их эпицентры располагались в районах интенсивной техногенной нагрузки в виде разработки месторождений [Маловичко, Габсатарова, Пойгина, Чепкунас, 2012]. В результате постоянно возрастающих масштабов горных работ происходит увеличение количества и магнитуды техногенных и природно-техногенных сейсмических событий (по классификации академика В.В. Адушкина). Риск возникновения индуцированных сейсмических событий значительной магнитуды зачастую возрастает при использовании новых технологий извлечения твердых и жидких полезных ископаемых. Сейсмические события, связанные с ведением горных работ, отличаются большим разнообразием, которые в целом можно классифицировать как техногенные, возникающие вследствие изменения естественного поля напряжений вблизи участков ведения работ, и природные, связанные со сдвиговым разрушением в ослабленных тектонических зонах на больших расстояниях от горных вы-

работок. При этом из-за малой глубины очага такие события часто приводят к существенному ущербу для зданий и сооружений, расположенных на поверхности, не говоря уже об инфраструктуре рудников, которая во многих случаях оказывается полностью разрушенной. В этой связи задача разработки новых методов контроля платформенных территорий для обеспечения сейсмически безопасного ведения горных работ и размещения особо ответственных объектов является весьма актуальной. В данной работе рассмотрены результаты апробации системы мониторинга техногенных землетрясений на шахте комбината КМАруда, разрабатывающей Коробковское месторождение железистых кварцитов в бассейне Курской магнитной аномалии, который характеризуется низким уровнем естественной сейсмичности и высокой техногенной нагрузкой. *Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-17-00095).*

ИОНОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ МАГНИТНОЙ БУРИ «ST. PATRICK'S DAY» 17 МАРТА 2015 г.

Б.Г. Гаврилов, Ю.И. Зецер, В.М. Ермак, А.Н. Ляхов, Ю.В. Поклад, И.А. Ряховский

Институт динамики геосфер РАН, Москва; boris.gavrilov34@gmail.com

Несмотря на десятилетия интенсивных исследований, механизмы многих физических процессов в ионосфере в период глобальных магнитосферных возмущений остаются не ясными, что связано в частности со сложностью получения реальных экспериментальных данных о состоянии ионосферы в ее различных областях. Сильнейшая в 24-м цикле солнечной активности магнитная буря 17 марта 2015 г. (St. Patrick's Day magnetic storm) привела к появлению глобальных и региональных ионосферных возмущений (ионосферных бурь), наблюдавшихся на всех континентах. Буря вызвала генерацию значительных высыпаний, сопровождавшихся полярными сияниями, наблюдавшимися в северном полушарии до географической широты 48°.

Для изучения ионосферных возмущений в среднеширотной Европе средствами ГФО «Михнево» ИДГ РАН были проведены комплексные исследования, включавшие синхронную регистрацию и совместный анализ магнитных и электрических полей, полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы, параметров КВ и СДВ волн на глобальных и региональных трассах распространения. Полученные данные показывают, что область возмущения ионосферы охватывала высоты от D до F слоя ионосферы. Пространственно-временное распределение ионосферных неоднородностей и динамика отклика среднеширотной ионосферы на магнитную бурю существенно сложнее, чем это можно получить в рамках традиционных методов исследования (радиозондирование ионосферы, спутниковые измерения) F слоя ионосферы. Данные по изменению фаз СДВ-радиосигналов и вариаций ПЭС позволяют составить представление о динамике ионосферной бури, вызвавшей эти изменения не только в зональном и широтном направлениях, но и о связи возмущений в верхней и нижней ионосфере.

Поведение ПЭС характерно для отрицательной фазы ионосферной бури. Главная причина колебаний амплитуд ОНЧ сигналов являются очевидно мощные электронные и протонные высыпания, вызвавшие изменения в верхней стенке волновода земля-ионосфера (D и E областей ионосферы). Предложенный подход обеспечивает эффективный способ изучения ионосферных процессов, а совместный анализ ПЭС и параметров распространения ОНЧ сигналов является перспективным методом исследования сложных взаимосвязанных процессов в верхней и нижней возмущенной ионосфере. Дальнейшее развитие такого подхода позволит уточнить физические механизмы возмущений верхней и нижней ионосферы и обеспечить возможность их учета при разработке и совершенствовании прогностических моделей ионосферы.

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РЕГИОНА РАСПОЛОЖЕНИЯ РОСТОВСКОЙ АЭС

Г.Н. Иванченко, С.Б. Кишкина, Д.Н. Локтев

Институт динамики геосфер РАН, Москва

При оценке особенностей сейсмичности платформенных территорий большую роль играет оценка геодинамической обстановки региона, степень неотектонической и современной активности геологических структур, исследование сейсмотектоники и развития опасных геологических процессов. Регион расположения Ростовской АЭС отличается сложной структурно-геологической обстановкой, которая определяется взаимодействием тектонических структур 1 порядка: Восточно-Европейской платформы, Скифской эпипалеозойской плиты и разделяющей их, сложно построенной зоны Днепровско-Донецкого авлакогена, состоящей из кряжа Карпинского и Донецкой складчатой системы. Район исследований находится в непосредственной близости от активной альпийской зоны Кавказа. Большое влияние на тектогенез региона оказали также Черноморская и Прикаспийская впадины.

В регионе выделяются несколько геодинамически активных зон XIV-XII порядков (считаем, что к геодинамически активным надёжно относятся только те структуры, в пределах которых зафиксированы четвертичные, голоце-

новые или современные асейсмичные и сейсмогенные перемещения). С целью уточнения характеристик выделенных зон с апреля по октябрь примерно в 10-ти километрах от площадки АЭС и от города Волгодонска была установлена малоапертурная сейсмическая группа. За этот период в зоне 400 км от площадки АЭС зафиксировано 16 источников тектонических сейсмических событий $1.2 < M < 4.7$; в том числе приуроченных к Северо-Кавказским и Северо-Азовскому сейсмолинеamentу. Наиболее значимое из этих событий – Мариупольское землетрясение (07.08.2016, $M \sim 4.7$) – вызвало на площадке АЭС сотрясения интенсивностью ~ 1 балл. Сопоставление результатов анализа сейсмических данных с имеющимися картами линеamentов района Ростовской АЭС подтверждает, что площадка расположена в пределах целостного блока XIII порядка. Выделяются линеamentные зоны XIV, XIII и XII порядков, которые являются границами блоков. Все линеamentные зоны структурно-геоморфологически предопределены и активизированы в четвертичное время. Они выражаются в рельефе и неотектонической зональности региона.

Изучения геолого-тектонической обстановки, рельефа, современной геодинамики территории размещения площадки Ростовской АЭС позволили уточнить положение тектонически активных структур, проследить историю их развития и активность на неотектоническом и современном этапах, определить возраст последней активизации. *Работа выполнена в рамках госзадания НИР по теме «Разработка методов сейсмического мониторинга районов расположения особо ответственных объектов на базе проведения режимных наблюдений на площадках строящихся АЭС. Локальный сейсмический мониторинг с целью прогнозирования возникновения катастрофических процессов на объекте (№ 0146-2014-0010).*

ИНФРАЗВУКОВЫЕ СИГНАЛЫ ОТ РУМЫНСКОГО БОЛИДА

О.П. Попова¹, Ю.С. Рыбнов¹, В.А. Харламов¹, Е.Д. Подобная¹, D. Chica², J. Borovicka³

¹ – Институт динамики геосфер РАН, Москва

² - National Institute for Earth Physics, Romania

³ - Astronomical Institute of the Czech Academy of Sciences, Czech Republic

Дана оценка параметров Румынского болида по акустическим сигналам в ближней зоне и оптическому излучению. Пролет яркого болида 07.01.2015 г. был зарегистрирован акустической станцией Центра Данных Румынии и оптическими датчиками Европейской болидной сети. Траектория болида прошла практически над акустической станцией и ударная волна была зарегистрирована в зоне прямого распространения, что является крайне редким событием. В данной работе проводится анализ акустических и оптических сигналов и дается оценка энергии данного события.

Научное издание

ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ГЕОСИСТЕМАХ

6-9 июня 2017 г., ИДГ РАН, (г. Москва)

Тезисы докладов

*Ответственные редакторы:
академик РАН В.В. Адушкин,
д.ф.-м.н. Г.Г. Кочарян*

Оригинал-макет *В.В. Ежакова*

ООО «Издательство «ГЕОС»
129315, Москва, 1-й Амбулаторный проезд, 7/3-114
Тел./факс: (495) 152-19-14
e-mail: geos-books@yandex.ru
www.geos-books.ru

Подписано к печати 26.05.2017
Формат 60X90/80. Офсет № 1, 80 гр./м²
Уч.-изд.л. 19,7. Тираж 150 экз.

Отпечатано в типографии ООО «Графитекс»
105082, Москва, ул. Малая Почтовая, 12, стр. 5