

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
**ИНСТИТУТ ДИНАМИКИ ГЕОСФЕР**  
Российской академии наук  
Российский фонд фундаментальных исследований

V-я Международная конференция  
**ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ**  
**В ГЕОСИСТЕМАХ**  
(Москва, 4–7 июня 2019 г.)

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Москва  
ИДГ РАН  
2019

УДК 550.3; 551.2; 551.3

*Издание осуществляется при финансовой поддержке  
Российского фонда фундаментальных исследований  
по проекту № 19-05-20008*

**Триггерные эффекты в геосистемах:** тезисы докладов V-й Международной конференции, Москва, 4–7 июня 2019 г. М. : ГЕОС. 2019. – 217 с.

**ISBN 978-5-89118-791-7**

В сборнике содержатся тезисы докладов, представленных на V-й Международной конференции «Триггерные эффекты в геосистемах» (Москва, 4–7 июня 2019 г.). В тезисах отражены актуальные вопросы воздействия природных и антропогенных факторов на различные геосфера, геомеханические системы и техногенные объекты, находящиеся в сублитическом состоянии, а также влияние этих воздействий на систему «атмосфера-ионосфера».

**ОРГАНИЗАТОРЫ:**

**Министерство науки и высшего образования РФ**  
**Отделение наук о Земле Российской академии наук (ОНЗ РАН)**  
**Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ)**  
**Институт динамики геосфер РАН (ИДГ РАН)**

**СОПРЕДСЕДАТЕЛИ ОРГКОМИТЕТА:**

академик РАН *В.В. Адушкин* (ИДГ РАН)  
академик –секретарь ОНЗ РАН *А.О. Глико*

**ЗАМЕСТИТЕЛИ ПРЕДСЕДАТЕЛЯ ОРГКОМИТЕТА:**

*Г.Г. Kocharyan* – профессор, д.ф.-м.н., *А.Н. Ляхов* – к.т.н.

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ ПРОГРАММНОГО КОМИТЕТА:** *С.Б. Турунтаев* – д.ф.-м.н.,  
**ЗАМ. ПРЕДСЕДАТЕЛЯ:** *Н.В. Болдовский* – д.г.-м.н.

**ЧЛЕНЫ ОРГКОМИТЕТА:**

*А.А. Барях* – чл.-корр. РАН, ПФИЦ УрО РАН  
*А.Д. Гвишиани* – академик РАН, ГЦ РАН  
*А. Дыскин* – проф., университет Западной Австралии (Австралия)  
*Ж.Ш. Жантаев* – д.ф.-м.н., Институт ионосферы (Казахстан)  
*В.Н. Захаров* – чл.-корр. РАН, ИПКОН РАН  
*В.А. Зейгарник* – д.т.н., ОИВТ РАН  
*К.Ч. Кожогулов* – д.т.н., Институт геомеханики и освоения недр (Кыргызстан)  
*А.А. Козырев* – д.т.н., Горный институт КНЦ РАН

*В.Б. Лапшин* – д.ф.-м.н., МГУ  
*Л.И. Лобковский* – чл.-корр. РАН, ИО РАН  
*А.А. Маловичко* – чл.-корр. РАН, ФИЦ ГС РАН  
*П.М. Нагорский* – д.ф.-м.н., ИМКЭС СО РАН  
*В.А. Петров* – чл.-корр. РАН, ИГЕМ РАН  
*В.В. Ружич* – д.г.-м.н., ИЗК СО РАН  
*Г.А. Соболев* – чл.-корр. РАН, ИФЗ РАН  
*С.А. Тихоцкий* – чл.-корр. РАН, ИФЗ РАН  
*B. Orlecka-Sikora* – проф., Институт геофизики (Польша)  
*Chegzhi Qi (Ци Чен Чжи)* – д.ф.-м.н., Пекинский университет Гражданского Инжиниринга и Архитектуры (Китай)  
*E. Papadimitriou* – проф., Aristotle University of Thessaloniki (Греция)

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ:

*С.Д. Викторов* – д.т.н., ИПКОН 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.К. Рыбин* – д.ф.-м.н., НС РАН  
*И.Н. Соколова* – д.ф.-м.н., ИГИ (Казахстан)  
*А.А. Спивак* – д.ф.-м.н., ИДГ РАН  
*А.В. Тащилин* – д.ф.-м.н., ИСЗФ СО РАН  
*П.Н. Шебалин* – д.ф.-м.н., ИТПЗ РАН

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

## СОДЕРЖАНИЕ

Влияние взрывных работ на возникновение катастрофических техногенно-тектонических землетрясений в Кузбассе(В.В. Адушкин) .....	17
Модель эволюции литосферы орогенов высокой Азии (Р.С. Алексеев).....	18
Блоковая модель очага землетрясений(С.А. Арсеньев).....	18–19
Моделирование современных геотектонических процессов сибирской платформы и её обрамления (А.Ж. Ахметов, П.В. Макаров, А.Ю. Пёрышкин, И.Ю. Смолин).....	19–20
Этапы формирования разломной зоны при сдвиге по простирианию и сопутствующие динамические эффекты сейсмичности горных выработок (Р.А. Бакеев, Ю.П. Стефанов, Г.Г. Кочарян).....	20–21
Оценка магнитуды повторных толчков после землетрясения 2018.01.09, М3.4 в Хибинском массиве (С.В. Баранов, П.Н. Шебалин, А.Е. Ганнибал ) ....	21–22
Горные работы как триггер тектонического процесса (А.С. Батугин) .....	22–23
Особенности старта и остановки разрыва на разломах с гетерогенной поверхностью (И.В. Батухтин, А.М. Будков, Г.Г. Кочарян).....	23
Радиоволновая диагностика зон тектонических нарушений земной коры в Байкальской рифтовой зоне (Ю.Б. Башкуев, В.Б. Хаптанов, М.Г. Дембелов)....	24
Анализ вероятностных полей ионосферных параметров, полученных по вероятностной плазмохимической модели нижней ионосферы (С.З. Беккер, И.А. Ряховский) .....	24–25
О влиянии возмущенности магнитосферы на ротационный режим земли (В.Ю. Белашов, И.А. Насыров ) .....	25–26
Ионосферные наблюдения над Новосибирском во время землетрясений на Алтае (А.Ю. Белинская, А.А. Ковалев) .....	26–27
Мониторинг и прогноз триггерных эффектов, инициирующих землетрясения (О.В. Бенкендорф, С.В. Лебедев, В.Н. Боков) .....	27
Анализ микросейсмического фона перед сильными землетрясениями (А.Н. Беседина) .....	27–28
Отклик водоносыщенного коллектора на прохождение сейсмических волн в ближней зоне массового взрыва в шахте (А.Н. Беседина, Э.М. Горбунова, А.А. Остапчук, Д.В. Павлов) .....	28–29
Воздействие мощных КВ радиоволн на высокоширотную F-область ионосферы: результаты экспериментов на комплексе EISCAT/HEATING в Северной Норвегии (Н.Ф Благовещенская, А.С. Калишин, Т.Д. Борисова, Т.Йоман, И.Хаггстром).....	29–30
Эволюция полей напряжений в процессе суперконтинентального цикла: численное моделирование (А.М. Бобров, А.А. Баранов).....	30–31

Использование возможностей локальной сейсмической сети юга Сахалина для уточнения гипоцентрии методом сейсмотомографии ( <i>Н.В. Богинская, Д.В. Костылев, М. Ичинаяги, Х. Такахаши</i> ) .....	31–32
Феноменологическая модель роев землетрясений, взаимосвязь с триггерной сейсмичностью ( <i>Л.М. Богомолов, А.С. Закупин, П.А. Каменев, Н.В. Богинская</i> ) .....	32–33
Эволюция напряженного состояния образцов мрамора при испытаниях на одноосное сжатие и воздействие электромагнитных полей ( <i>Л.М. Богомолов, А.С. Закупин, В.А. Мубассарова и др.</i> ).....	33–34
Экзогенное инициирование деформационных процессов при различных типах механизма очага землетрясений ( <i>В.Н. Боков, О.В. Бенкendorф, С.В. Лебедев</i> ).....	34
Экзогенное инициирование внезапных выбросов метана в шахтах ( <i>В.Н. Боков, Ю.В. Грибанова</i> ) .....	34–35
Особенности напряженного состояния земной коры южной части Хибинского массива ( <i>И.В. Бондарь, А.В. Маринин</i> ) .....	35–36
Формализованный прогноз параметров закона Гутенберга-Рихтера на основе геодинамических и сейсмотектонических данных ( <i>Е.Г. Бугаев, С.Б. Кишкина</i> ).....	36–37
Моделирование переноса оптического излучения подоблачных молний в космос ( <i>В.П. Бусыгин, И.Ю. Кузьмина</i> ) .....	37–38
Роль кристаллизации и перекристаллизации пород в инициировании деформационных процессов в земной коре ( <i>А.Е. Великанов</i> ).....	38–39
Гравитационная связь сейсмичности с избыточными массами геологической среды на территории Центральной Азии ( <i>А.Е. Великанов, И.Л. Аристова</i> ) .....	39–40
Неустойчивость трения горных пород в лабораторном эксперименте ( <i>В.И. Веттегренъ, И.П. Щербаков, Р.И. Мамалимов и др.</i> ).....	40–41
О возможности мониторинга деформационных процессов в земной коре по GPS наблюдениям ( <i>А.В. Вильяев</i> ). ....	41–42
Нетектоническая сейсмичность в криолитосфере ( <i>Ю.А. Виноградов, А.В. Федоров, А.Н. Виноградов</i> ).....	42–43
Триггерный эффект периодического силового воздействия на горные породы ( <i>А.С. Вознесенский, М.Н. Красилов, Я.О. Куткин и др.</i> ).....	43–44
О свойствах и характере широтной зависимости статистических распределений вариаций геомагнитного поля ( <i>А.В. Воробьев, Г.Р. Воробьева</i> ).....	44–45
Импульсные возмущения геомагнитного поля в ночные часы ( <i>А.В. Воробьев, В.А. Пилипенко, В.А. Мартинес-Беденко</i> ).....	45
Триггерные эффекты в проявлении сейсмичности в Терско-Каспийском прогибе( <i>И.П. Габсатарова</i> ).....	46
Радиофизический измерительный комплекс Геофизической обсерватории «Михнево» ( <i>Б.Г. Гаврилов, Ю.И. Зецер, Ю.В. Поклад и др.</i> ).....	47–48
Индикаторы изменений НДС геосреды при подготовке и реализации сильных тектонических землетрясений по данным многолетних измерений с подземными электрическими антеннами	

<i>(В.А. Гаврилов, А.В. Дештеревский, Ю.Ю. Бусс и др.)</i> .....	48
Отражение процесса подготовки сильного близкого Жупановского землетрясения (30.01.2016 г., $m = 7.2$ , $re = 107$ км) в данных комплексных скважинных измерений на Петропавловск–Камчатском геодинамическом полигоне ( <i>В.А. Гаврилов, Ю.В. Морозова, А.В. Дештеревский и др.</i> ).....	49
Системный анализ в изучении природных экстремальных событий и их триггерных эффектов ( <i>А.Д. Гвишиани</i> ).....	49–50
Разломная тектоника и сейсмичность Приамурья ( <i>Г.З. Гильманова, Т.В. Меркулова</i> ).....	50–51
Аппроксимационные соотношения для оценки воздействия ударной волны при ударах космических тел размерами от нескольких метров до 3 км ( <i>Д.О. Глазачев</i> ).....	51–52
Аномалии временных вариаций естественного импульсного электромагнитного поля земли (ЕИЭМПЗ) как предвестники землетрясений ( <i>В.Ф. Гордеев, С.Ю. Малышков, В.И. Поливач, С.Г. Шталин</i> ).....	52–53
Взаимосвязь неотектоники и полезных ископаемых района Оленекского поднятия ( <i>Н.А. Гордеев, Л.А. Сим, Т.В. Суханова, И.В. Бондарь</i> ).....	53–54
О точности осреднения в плоских задачах stick-slip и моделирование тектонических землетрясений ( <i>А.Ю. Губарь</i> ).....	54–56
Атлас афтершоков сильных землетрясений ( <i>А.В. Гульельми, А.Д. Завьялов, О.Д. Зотов</i> ).....	56–57
Взаимодействие деформационного поля и местной сейсмичности на Северном Кавказе ( <i>Т.В. Гусева, И.С. Крупенникова, А.Н. Мокрова, Н.К. Розенберг</i> ).....	57–58
Триггерные эффекты в сейсмическом процессе: спусковой крючок или новое содержание ( <i>И.Л. Гуфельд, О.Н. Новоселов</i> ).....	58–59
Статистические закономерности формирования магистральной трещины в горных породах: акустическая эмиссия и рентгеновская томография ( <i>Е.Е. Дамаскинская, В.Л. Гиляров, И.А. Пантелеев и др.</i> ).....	59–60
Роль ионосферы в стимулированных высыпаниях авроральных электронов ( <i>М.Г. Деминов</i> ).....	60–61
Математическая модель ионосферного электрического поля, замыкающего глобальную электрическую цепь ( <i>В.В. Денисенко, М.Д. Райкрофт, Р.Д. Харрисон</i> ).....	61–62
Вариации спектрального состава слоя годовых колебаний температур при землетрясениях в различных мерзлотно-сейсмических районах Восточной Сибири ( <i>В.И. Джурик, Е.В. Брыжак, С.П. Серебренников, А.Ю. Ескин</i> ).....	62–63
Алгоритм с единственным классом обучения в распознавании сейсмоопасных зон ( <i>Б.А. Дзебоев, А.Д. Гвишиани, А.А. Королькова</i> ).....	63–64
Сейсмичность Восточно-Байского разреза (Хакасия): дискриминация слабых землетрясений и взрывов ( <i>А.А. Добрынина, В.И. Герман</i> ).....	64–65
Параметры очага Катав-Ивановского землетрясения 4 сентября 2018 г. по инструментальным и макросейсмическим данным	

(Р.А.Дягилев, И.П.Габсатарова, А.Г.Енифанский).....	66–67
Исследование процесса развития очага тектонического землетрясения с применением метода согласования спектральных фаз (А.Г.Енифанский).....	67
Сейсмический процесс, сопровождающий формирование Чуйско-Курайской разломной зоны. Математическое моделирование (М.О. Еремин).....	68–69
Триггерный эффект теплового потока на распределения критического уровня деформаций в очаговых зонах (Ж.Ш.Жантаев, А.В. Виляев).....	69
Использование геолого-геофизических данных при выявлении структурно однородных областей земной коры (на примере Каспийского региона) (Ж.Ш. Жантаев, А.Г. Фремд, Б.А. Исаков).....	69–70
Влияние солнечной активности на сейсмический режим земной коры на примере Северного Тянь-Шаня (Ж.Ш.Жантаев, Г.Я.Хачикян, А.Б. Садыкова).....	70–71
О принципах заоткосных работ при открытой разработке месторождений(С.Н.Жариков, В.А.Кутуев).....	71–72
Пространственно-временные структуры афтершоковых последовательностей(А.Д.Завьялов, О.Д.Зотов, Б.И.Клайн).....	72–73
О взаимодействии процессов взрывного разрушения и геомеханики при разработке месторождений полезных ископаемых (В.Т.Закалинский, С.Д.Викторов, И.Е.Шиповский, Р.Я.Мингазов).....	73–74
Систематизация результатов исследований сейсмического процесса методом LURR (Load-Unload Response Ratio) на Сахалине(А.С.Закупин).....	74–75
Генерация метана при разрушении угля (В.Н. Захаров, О.Н. Малинникова).....	75–76
Взаимное влияние трёхмерных трещин в упругом теле (А.В.Звягин, А.А.Лужин, А.А.Шамина).....	76–77
Инициирование разрушения образца искусственного песчаника электрическим воздействием (В.А. Зейгарник, В.Н. Ключкин, В.И. Окунев).....	77
Изменение проницаемости ультразвукопроницаемых пористых сред под воздействием внешней нагрузки (Е.В.Зенченко, С.Б.Турунтаев, Н.А.Барышников).....	78
Активный и пассивный акустический мониторинг трещины гидроразрыва в лабораторном эксперименте (Е.В.Зенченко, П.Е.Зенченко, А.А.Лукина, С.Б.Турунтаев).....	79
Сейсмические триггеры развития рудообразующих систем гидротермальных месторождений золота (Т.М. Злобина, В.А.Петров, В.Ю.Прокофьев и др.).....	80–81
Динамика сейсмической активности Южной Калифорнии до и после землетрясения Гектор Майн (1999, M = 7.1) (О.Д. Зотов).....	81
Триггерный режим в динамике магнитосферы и статистические свойства АР-индекса и параметра $\beta$ (О.Д. Зотов, Б.И.Клайн, Н.А.Куражковская).....	81–82
Акустическая флюидизация при образовании ударных кратеров (Б.А.Иванов).....	82–83

Формализованный линеаментный анализ как основа сейсмического мониторинга платформенной территории (например Курской АЭС) (Г.Н. Иванченко, С.Б. Кишикина).....	83–84
Аномально высокое пластовое давление в среде с двойной пористостью: континуальное разрушение иакустические свойства (О.Я. Извеков, И.А. Чепрасов).....	84
Динамика пылевых частиц в конвективных вихрях у поверхности Земли: аналогии с Марсом (Ю.Н. Извекова, С.И. Попель, О.Я. Извеков).....	84–85
Эффекты воздействия реактивных двигателей кораблей «Прогресс» на ионосферу по данным GPS приемников японской сети GEONET (А.Б. Ишин, С.В. Войков, В.В. Хахинов).....	85–86
Триггерное термическое воздействие на развитие микродефектов структуры горной породы, сформированных в ходе предварительного механического нагружения (П.А. Казначеев, З.Я. Майбук, А.В. Пономарев, А.В. Патонин).....	86–87
Разработка геомеханической модели Южной части Центрально-Сахалинского разлома (П.А. Каменев, А.Е. Заболотин, Л.М. Богомолов, М.А. Мищенко М.А.).....	87–88
Возможные направления в сейсмоэлектрических исследованиях (А.Н. Камишин, П.А. Казначеев).....	88
Анализ характеристик метеорных частиц по комбинированным наблюдениям (А.П. Карташова, Ю.С. Рыбнов, О.П. Попова и др.).....	89
Миграция деформации земной поверхности, как триггер крупного землетрясения (В. Кафтан В., А. Мельников).....	89–90
Исследование процессов энергообмена в зоне влияния активных разломов (на примере массива пород кировского рудника КФ АО «Апатит») (Э.В. Каспарьян, Ю.В. Федотова, Н.Н. Кузнецова).....	90–91
О связи сейсмических процессов и атмосферных возмущений в период подготовки сильных землетрясений (В.Б. Кацкин, Р.В. Однцов, А.А. Романов и др.).....	91–92
Математическое моделирование динамических и квазистатических процессов в зонах сейсмической активности (А.С. Ким, Ю.Р. Шпади, Ю.Г. Литвинов).....	92–93
Точное решение задачи о сжатии (расширении) трубы из несжимаемого вязкопластического материала, погруженной в несжимаемую вязкую жидкость, под действием внешних динамических нагрузок (А.Б. Киселев).....	93–94
Базовые принципы методики сейсмического мониторинга для районов расположения площадок АЭС (С.Б. Кишикина).....	94–95
Триггерная активация возмущения ионосферной плазмы при оптическом возбуждении нейтральной компоненты среды (И.Х. Ковалева, А.Т. Ковалев).....	95
Устойчивость бортов карьеров при добыче полезных ископаемых Кыргызстана (К.Ч. Кожогулов, О.В. Никольская).....	96
Изменение сейсмичности массива горных пород при ведении горных работ вблизи Саамского разлома на Кировском руднике КФ АО «Апатит» (А.А. Козырев, О.Г. Журавлева, С.А. Жукова).....	96–97

Применение комплексного подхода к прогнозу опасных динамических явлений на примере ретроспективных данных в районе горно-тектонического удара на Расвумчоррском руднике 09.01.2018 г. <i>(А.А. Козырев, И.Э. Семенова, О.Г. Журавлева)</i> .....	97–98
Сейсмичность и поле поглощения S-волн в районе Гиндукуша: процессы дегидратации и миграции глубинных флюидов <i>(Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова)</i> .....	98
Особенности флюидодинамических процессов в сейсмоактивном регионе (например Камчатки) ( <i>Г.Н. Копылова, С.В. Болдина</i> ).....	99–100
Сейсмоакустические и геохимические триггеры геологических процессов <i>(А.А. Корнилова, С.Н. Гайдамака, А.В. Николаев)</i> .....	100–101
Влияние продолжительной микросейсмической активности и неровностей дна на образование сильных океанических волн <i>(А.В. Корольков, О.В. Логвинов, А.А. Малашин, В.Л. Натяганов)</i> .....	101
Система комплексных геофизических наблюдений в зоне активного разлома Южного Сахалина ( <i>Д.В. Костылев, П.А. Каменев</i> ).....	102–103
Влияние многократных слабых ударных воздействий на эволюцию напряжений и деформаций геоматериалов ( <i>В.П. Косых</i> ).....	103
Исследования возмущений геомагнитного поля в диапазоне 0,001–0,03 Гц при воздействии на ионосферу мощным радиоизлучением стенда СУРА ( <i>Д.С. Котик, А.В. Рябов, В.Н. Иванов и др.</i> ).....	104
Нагрев ионосферы радиоизлучением наземных установок в диапазонах средних и длинных волн ( <i>Д. Котик, А. Рябов, В. Яшинов</i> ).....	105
Развитие трещин на разных масштабных уровнях при динамическом воздействии на горные породы ( <i>А.Н. Кочанов</i> ).....	106
Инициирование тектонических землетрясений горными работами ( <i>Г.Г. Kocharyan, А.М. Будков, С.Б. Кишкина</i> ).....	107
Особенности атмосферного электрического поля в условиях аэрозольного загрязнения атмосферы техногенными источниками ( <i>А.В. Крашенинников, Д.Н. Локтев, С.П. Соловьев</i> ).....	107–108
Современная геодинамика разломов, индуцированная эксплуатацией объектов нефтегазового комплекса ( <i>Ю.О. Кузьмин</i> ).....	108–109
Анализ результатов геодеформационного мониторинга шельфовых месторождений Северного Каспия <i>(Ю.О. Кузьмин, А.В. Дештеревский, Е.А. Фаттахов и др.)</i> .....	109–110
Моделирование разлета струи Al с учетом кинетики ионизации–рекомбинации ( <i>М.Ю. Кузьмичева</i> ).....	110
Исследование Каджи-Сайского уранового хвостохранилища напредмет состояния гео-опасности ( <i>Ж.Э. Кулебеков, С.Ж. Орунбаев</i> ).....	110–111
Моделирование процесса аккумулирования и высвобождения энергии в геосреде под действием приливных сил <i>(С.В. Лавриков, А.Ф. Ревуженко)</i> .....	111–112
Космическая погода – современное состояние и перспективы ( <i>В.Б. Лапшин</i> ).....	112–113
Распределение сейсмической активности разноуровневых геосистем по fazam солнечного цикла ( <i>Е.А. Левина</i> ).....	113–114

Механика гранулярно-блочных субстанций и механизм деформации геологических объектов фундамента и чехла Восточно-Европейской платформы ( <i>М.Г. Леонов</i> ).....	114–115
Формы дезинтеграции (грануляции) кристаллических породных комплексов («тектоника разрыхления») ( <i>М.Г. Леонов, Е.С. Пржиялговский, Е.В. Лаврушина</i> ).....	115
Исследование на модельных образцах особенностей образования трещинпригидроразрывескважин ( <i>А.В. Леонтьев, Е.В. Рубцова</i> ).....	115–116
Закономерности возрастания и снижения триггерной сейсмичности массива при отработке Ловозерского редкометальногоместорождения ( <i>А.В. Ловчиков</i> ).....	116–117
Численное моделирование радиационных эффектов в активных геофизических ракетных экспериментах ( <i>Т.В. Лосева, И.Б. Косарев, А.Н. Ляхов и др.</i> ).....	117–118
Исследование триггерного эффекта в удароопасном массиве горных пород методом лазерной интерферометрии ( <i>В.А. Луговой, Г.И. Долгих, Д.И. Цой и др.</i> ).....	118–119
Глобальные связи между собственными шумами Земли: тремор земной поверхности, сейсмические шумы, нерегулярность вращения планеты ( <i>А.А. Любушин</i> ).....	119–120
Геофизические эффекты высотных ядерных испытаний 1962 года ( <i>А.Н. Ляхов</i> ).....	120–121
Изменение скорости фильтрации флюида в образцах песчаника при воздействии электрическим током ( <i>З.Я. Майбук, С.М. Киреенкова, А.В. Пономарев, Г.А. Соболев</i> ).....	121–122
Зональная дезинтеграция угольного пласта как явление, предшествующее внезапному «отжиму» пласта ( <i>В.В. Макаров, В.Н. Одинцов</i> ).....	122–123
Формирование кайнозойского рельефа в складчатых областях Центральной и Юго-Восточной Азии. Математическое моделирование ( <i>П.В. Макаров, М.О. Еремин, А.Ю. Перышкин</i> ).....	123–124
Медленные волны деформации как триггеры катастрофических разрушений. Особенности генерации и распространения ( <i>П.В. Макаров, А.Ю. Перышкин</i> ).....	124–125
Мониторинг техногенного оползня ( <i>С.Ю. Малышков, В.Ф. Гордеев, В.И. Поливач, С.Г. Шталин</i> ).....	125–126
Демпфирование распространения косейсмического разрыва ( <i>В. Мартынов, А. Будков, А. Остапчук</i> ).....	126
Сравнительный анализ влияния триггерных факторов электромагнитной природы на формирование торнадо ( <i>С.А. Маслов, В.Л. Натяганов</i> ).....	127
Бесконтактный метод измерения параметров слабых электростатических полей (ЭП) в стационарных и динамических условиях ( <i>Х.Ф. Махмудов</i> ).....	127–128
Исследование акустических свойств горного массива и бетонной обделки внатурных условиях ( <i>Х.Ф. Махмудов, В.Н. Савельев</i> ).....	128–129

Разработка методов акусто-эмиссионного (АЭ) мониторинга геомеханической устойчивости и эксплуатационной безопасности некоторых подземных сооружений ФГУП «Горно-химический комбинат» («ГХК») – предприятия государственной корпорации «Росатом» ( <i>Х.Ф. Махмудов, В.Н. Савельев, В.Н. Медведев</i> ).....	129–130
ОНЧ – излучения, возбуждаемые электрическим генератором, установленным на борту спутника «Интеркосмос-24» ( <i>Ю.М. Михайлов</i> ).....	130–131
Возмущения магнитного поля, инициируемые при работе стенда «Сура», на расстоянии свыше 500 км от источника ( <i>Ю.М. Михайлов, В.И. Гайдук, О.В. Капустина</i> ).....	131
Автоматизация СГМ метода реконструкции неотектонических напряжений Л.А. Сим на примере Лено-Оленёкского междуречья ( <i>А.Б. Молчанов, Н.А. Гордеев</i> ).....	132–133
Закономерности излучения акустических импульсов при лабораторном прерывистом скольжении разлома ( <i>К.Г. Морозова, А.А. Остапчук, Д.В. Павлов</i> ).....	133
Математические модели влияния экзогенных процессов на напряженно-деформированное состояние континентальной литосферы ( <i>Д.С. Мягков</i> ).....	134–135
Изучение формирования напряженно-деформированного состояния Японской зоны субдукции до и после землетрясения Тохоку методом численного моделирования ( <i>Д.С. Мягков, В.В. Погорелов</i> ).....	135–136
Оценка характеристик жидких осадков по вариациям уровня фона ионизирующей радиации ( <i>П.М. Нагорский, И.В. Беляева, В.С. Яковлева и др.</i> ).....	136–137
Трансформация геофизических полей в антропогенной геосфере ( <i>П.М. Нагорский, Е.А. Дюкарев, В.С. Яковлева и др.</i> ).....	137–138
Пространственно-временные вариации атмосферно-электрических и метеорологических величин во время прохождения шквала ( <i>П.М. Нагорский, В.А. Корольков, К.Н. Пустовалов и др.</i> ).....	138
Влияние высоты снежного покрова на уровень $\beta$ -, $\gamma$ -фона и его вариаций в приземном слое атмосферы ( <i>П.М. Нагорский, В.С. Яковлева, К.Н. Пустовалов, С.В. Смирнов и др.</i> ).....	139
Гистерезисная модель накопления и разрядки сейсмической энергии в геологической среде ( <i>Л.И. Надежка, А.Е. Семенов, И.Н. Сафонич</i> ).....	139–140
Напряжения и проницаемость геоматериалов и горных пород: теория и лабораторный эксперимент ( <i>Л.А. Назаров, Л.А. Назарова, Н.А. Голиков</i> ).....	140–141
Астрономическая обусловленность неординарных проявлений тектонической активности и критические параллели планеты ( <i>В.Л. Натяганов, Ю.Д. Скобеников, В.М. Федоров</i> ).....	141–142
Геоэлектрические модели разломных зон Горного Алтая ( <i>Н.Н. Неведрова, С.М. Бабушкин, И.О. Шапаренко</i> ).....	142–143
Разломно-блоковое строение межгорных впадин Горного Алтая по данным геоэлектрики ( <i>Н.Н. Неведрова, А.М. Санчаа</i> ).....	143
Оптимальные методики и параметры электромагнитного мониторинга	

в сейсмоактивных районах ( <i>Н.Н. Неведрова, А.Е. Шалагинов</i> ).....	144–145
Влияние наклона магнитного поля на проникновение	
квазистационарного электрического поля с земли в ионосферу	
( <i>С.А. Нестеров, В.В. Денисенко, М.Я. Бoudьяда, Х. Ламмер</i> ).....	145
Учет сейсмического воздействия взрыва и динамических нагрузок	
от работы горнотранспортного оборудования при оценке	
устойчивости бортов карьеров, разрезов и отвалов	
( <i>И.Л. Никифорова, О.В. Зотеев, С.Н. Жариков</i> ).....	146–147
Приборно-методические принципы изучения триггерных явлений	
в геосистемах ( <i>А.В. Николаев, А.А. Верещагин, И.П. Башилов и др.</i> ).....	147–148
Управление сейсмическим процессом: утопия или реальные	
физические предпосылки? ( <i>В.А. Новиков</i> ).....	148–149
Влияние солнечных вспышек на глобальную сейсмическую	
активность: анализ воздействия солнечной вспышки	
класса X9.3 6 сентября 2017 г. ( <i>В.А. Новиков, Ю.Я. Ружин</i> ).....	149–150
Кривые давления ГРП как средство определение параметров пласта	
( <i>Е.В. Новикова, М.А. Тримонова, С.Б. Турунтаев, Е.В. Зенченко</i> ).....	150
Ротационный фактор: динамика и взаимодействие ядра	
и мантии ( <i>В.М. Овчинников, Д.Н. Краснощеков</i> ).....	151
Влияние взрывного воздействия на газодинамическое	
разрушение угольного пласта ( <i>В.Н. Одинцов</i> ).....	151–152
Комплексный анализ тектонического разлома по данным наземных	
наблюдений ( <i>А. Остапчук, Э. Горбунова, Д. Павлов и др.</i> ).....	153
Инициирование динамических событий на разломе с гетерогенной	
структурой ( <i>А.А. Остапчук, Д.В. Павлов, К.Г. Морозова</i> ).....	153–154
Предварительные результаты диагностики НДС массива при	
землетрясении в районе г. Катав-Ивановск ( <i>А.А. Панжин, Н.А. Панжина</i> ).....	154–155
Определение тензора сейсмического момента событий акустической	
эмиссии при трехточечном изгибе рамора ( <i>И.А. Пантелеев</i> ).....	155–156
Синхронизация мультифрактальных свойств непрерывной акустической	
эмиссии при подготовке и реализации подвижки по модельному разлому	
( <i>И.А. Пантелеев, В.И. Окунев, В.А. Новиков</i> ).....	157
Влияние внешних факторов на развитие трещин в горных породах	
( <i>П.Е. Панфилов, А.Н. Кочанов, Г.П. Панфилов, Д.В. Зайцев</i> ).....	157–158
Сложное строение и взаимодействие разломов: свидетельство	
статического и динамического инициирования землетрясений	
( <i>Э. Пападимитриу, В. Каракостас</i> ).....	159
Вычислительное моделирование распространения трещины	
гидравлического разрыва в неоднородной среде ( <i>Д.А. Пестов</i> ).....	159–160
Исследование устойчивости фронта окисления в зависимости	
от перепада давления при фильтрации с выделением газовой фазы	
( <i>Р.А. Плавник, И.Н. Завьялов</i> ).....	160–161
Аппроксимационные соотношения для радиационных эффектов	
из-за воздействия больших космических объектов	
( <i>Е.Д. Подобная, Д.О. Глазачев, О.П. Попова и др.</i> ).....	161
Вариации параметров D-слоя ионосферы во время рентгеновских вспышек	

на основе данных мониторинга СДВ передатчиков в ГФО «Михнево» (Ю.В. Покла, Б.Г. Гаврилов, В.М. Ермак и др.)	162
Разрушение горной породы при инжекции флюида – лабораторное моделирование триггерной сейсмичности (А.В. Пономарев, В.Б. Смирнов, А.В. Патонин и др.)	162–163
Двухфазная модель предшоковой стадии подготовки землетрясений применительно к Байкальской рифтовой зоне (Е.И. Пономарёва)	164–165
Анализ оптических и инфразвуковых наблюдений падения метеорита Озерки (О.П. Попова, Ю.С. Рыбнов, В.М. Харламов, Д.О. Глазачев)	165
Триггерное возбуждение УНЧ волн типа IPDP (эффект Виноградовой-Мальцевой) (А.С. Потапов, Б.В. Довбня, Б.И. Кайн, А.В. Гульельми)	166
Анализ условий активизации геодинамических процессов и проявления техногенной сейсмичности на подземных рудниках дальневосточного региона (И.Ю. Рассказов, В.А. Луговой, Д.И. Цой, А.В. Сидляр)	166–167
Геомеханика и тектонофизика о состоянии разлома перед землетрясением (Ю.Л. Ребецкий)	167–168
Вызванная сейсмичность при добыче нефти и газа – обзор (М.В. Родкин, Т.Л. Нго, Т.А. Рукавишникова, Т.Х. Фунг Тхи)	168–169
Экспериментальные исследования отклика ионосферы на катастрофические природные события и явления методом ОНЧ/НЧ просвечивания нижней ионосферы (А.А. Рожной, М.С. Соловьева, Б.В. Левин и др.)	169–170
Определение предельных параметров деформирования и разрушения массива горных пород карьера «Железный» (АО «Ковдорский ГОК») по данным наземного радара IBIS FM (И.Ю. Розанов, А.А. Завьялов)	170–171
Результаты геолого-геофизического изучения глубинных палеосейсмодислокаций в эксгумированных разломах (на примере краевого шва Сибирской платформы) (В.В. Ружич)	171–172
Объяснение проявлений солнечно-земных связей в сейсмогеодинамике (В.В. Ружич, Г.Я. Смольков, Е.А. Левина)	172–173
Скачки напряженности электрического поля и атмосферных токов по данным многолетних наблюдений в ГФО «Михнево» (В.А. Рыбаков, Б.Г. Гаврилов, Ю.В. Поклади др.)	173–174
Сейсмоакустические эффекты Липецкого болида 21.06.2018 г. (Ю. Рыбнов, А. Варыпаев, С. Волосов и др.)	174
Параметрическая модель спектра транспортных шумов (Ю.С. Рыбнов, А.В. Соловьев)	174–175
Методы снижения негативного воздействия взрывных работ в условиях интенсификации открытой геотехнологии (М.В. Рыльникова, В.С. Федотенко, С.В. Матва, С.В. Кокин)	175–176
Особенности геомагнитной активности на ГФО «Михнево» в 24-ом цикле солнечной активности (С.А. Рябова)	176–177
Нелокальные вариации магнитного поля Земли при падении метеоритов (С.А. Рябова, А.А. Спивак)	177
Годовые вариации абсолютного значения полного электронного содержания среднеширотной ионосферы по данным	

приемников ГНСС в ГФО «Михнево» ( <i>И.А. Ряховский, Б.Г. Гаврилов, А.Н. Ляхов и др.</i> ).....	177–178
К вопросу о современных землетрясениях центра и севера Русской плиты ( <i>И.А. Санина, Э.М. Горбунова, Г.Н. Иванченко и др.</i> ).....	178–179
Значимость металлогенических закономерностей в познании разномасштабных геологических процессов ( <i>Ю.Г. Сафонов</i> ) .....	179–180
Триггерный эффект астероидного удара на границе перми и триаса ( <i>В.В. Светцов, В.В. Шувалов</i> ).....	180–181
Критическое замедление при приближении системы к катастрофе ( <i>В.Н. Сергеев</i> ).....	181
Принцип неопределенности прогноза трех параметров землетрясения ( <i>В.Г. Сибгатулин, А.А. Кабанов</i> ).....	182
Особенности активизации Южно-Анюйской сутуры (Чукотка) вновейший этап ( <i>Л.А. Сим, Г.В. Брянцева, Д.А. Селиванов</i> ).....	182–183
Скейлинг двух характерных частот очаговых спектров для землетрясений вблизи острова Беринг ( <i>А.А. Скоркина</i> ).....	184
Сезонные вариации наклона графика повторяемости в триггерной сейсмичности Койна-Варна ( <i>В.Б. Смирнов, М.Г. Потанина, А.В. Пономарев и др.</i> ).....	184–185
Извержение вулкана Килауэа. Сейсмогравитационные процессы и гравитомагнитные возмущения, зафиксированные на этапе активизации вулкана ( <i>Л.Е. Собисевич</i> ).....	185–186
Сейсмогравитационные процессы, зарегистрированные в период развития Великого восточно-японского землетрясения ( <i>Л.Е. Собисевич, А.Л. Собисевич</i> ).....	186–187
Воздействие сильных магнитных бурь на сейсмический шум ( <i>Г.А. Соболев</i> ).....	187
Миграция в западном направлении сейсмических колебаний с периодом 130 мин, вызванных большими землетрясениями ( <i>Г.А. Соболев</i> ).....	187–188
Изменения низкочастотного сейсмического шума после больших землетрясений ( <i>Г.А. Соболев, Н.А. Закржеевская</i> ).....	188–189
Техногенные и природно-техногенные землетрясения в платформенных районах Казахстана ( <i>И.Н. Соколова, Н.Н. Михайлова, Н.Н. Полешко, А.Е. Великанов</i> ).....	189
Вариации акустического и электрического полей по наблюдениям в ГФО «Михнево» и ЦГМ ИДГ РАН ( <i>С.П. Соловьев, Ю.С. Рыбнов, А.В. Крашенников</i> ).....	190
К проблеме идентификации возмущений ионосферы от регулярных и нерегулярных гео-гелиофизических источников ( <i>В.М. Сомсиков, А.Б. Андреев, В.И. Капытин</i> ).....	190–191
Модель генерации геомагнитных вариаций волной цунами ( <i>В.М. Сорокин, А.К. Ященко</i> ).....	191–192
О возможности стимуляции сейсмической активности ионизирующим излучением солнечных вспышек ( <i>В.М. Сорокин, А.К. Ященко, В.А. Новиков</i> ).....	192
Прогностические признаки опасных атмосферных явлений в геофизических полях ( <i>А.А. Спивак, Ю.С. Рыбнов, С.А. Рябова и др.</i> ).....	193

Геофизические эффекты, вызванные падением Челябинского болида ( <i>А.А. Стивак, Ю.С. Рыбнов, С.П. Соловьев и др.</i> )	193–194
Учет заданного рельефа поверхности и сферичности при численном моделировании процессов деформации в земной коре ( <i>Ю.П. Стефанов, Р.А. Бакеев, В.Д. Суровов, Е.А. Мельник</i> )	194–195
Влияние взаимодействия природных и антропогенных факторов на гидросферу горнопромышленного региона ( <i>М.С. Стефунько</i> )	195–196
Увеличение выхода радона как реакция среды на вибровоздействие: возможные механизмы и подходы ( <i>М.В. Сухоруков</i> )	196
Электромагнитные зондирования земной коры и деформационные процессы в геосреде Бишкекского геодинамического полигона (БГП) ( <i>В.Н. Сычев, Л.М. Богомолов, Н.А. Сычева</i> )	197
Измерение газодинамических параметров течения разогретого газа в щели-применительном Баженовском свите ( <i>А.А. Таирова, Г.В. Беляков</i> )	197–198
Солнечная активность и триггерные эффекты в сейсмоактивных областях Земли ( <i>Н.Т. Тарасов</i> )	198–199
Влияние на сейсмичность электромагнитных полей и взрывов. Геодинамические последствия ( <i>Н.Т. Тарасов, Н.В. Тарасова</i> )	199–200
Влияние прочностных и реологических свойств среды на строение надвиговых деформационных структур ( <i>А.А. Татаурова, Ю.П. Стефанов</i> )	200–201
Влияние пластических свойств породы на возникновение трещины гидроразрыва ( <i>М.А. Тримонова, С.Б. Турунтаев, Е.В. Зенченко, И.О. Фасхеев</i> )	201–202
Об устойчивости деформирования массива горных пород ( <i>В.А. Трофимов</i> )	202–203
Прогнозирование флюидоподводящих разломов и оценка их современной активности на основе сейморазведки МОГТ и гравиразведки НГП ( <i>В.А. Трофимов, А.И. Волгина, А.А. Ефимов</i> )	203–204
Компьютерное моделирование динамического разрушения бортов карьера ( <i>В.А. Трофимов, И.Е. Шиповский</i> )	204–205
Гидроразрыв пласта и сопутствующая сейсмичность ( <i>С.Б. Турунтаев, Е.В. Зенченко, П.Е. Зенченко и др.</i> )	205–206
Реконструкция неоднородности поля напряжений-деформаций и флюидодинамики разломных зон на основе анализа микроструктурных индикаторов ( <i>С.А. Устинов, В.А. Петров, В.В. Полуэктов</i> )	206–207
Оценка энергии, выделившейся в магматической провинции Декан в результате удара астероида в Мексиканский залив на К-Pg границе ( <i>В.М. Хазинс, В.В. Шувалов</i> )	207–208
Новые методы мониторинга триггерных эффектов в земной коре с использованием современных физических теорий ( <i>О.А. Хачай, О.Ю. Хачай</i> )	208–209
Флюидодинамика в многоранговых составных иерархических структурах с различными физико-механическими свойствами ( <i>О.А. Хачай, А.Ю. Хачай</i> )	209–210
Геомагнитная сопряженность между южной границей литосферной	

плиты Нацка и северными границами плит Кокос и Карибская: возможное свидетельство экзогенного инициирования сейсмотектонических процессов в земной коре ( <i>Г.Я. Хачикян</i> ).....	210–211
Деформационные волны в горном массиве в окрестности глубоких выработок ( <i>Ч. Ци</i> ).....	211–212
Структурные превращения нано-зашемленной воды при высоких давлениях: потенциальный механизм триггерных эффектов в зонах субдукции ( <i>А.А. Цуканов, Е.В. Шилько, С.Г. Псахье</i> ).....	212–213
Анализ влияния приливных сил в качестве триггера малоглубинных землетрясений ( <i>Д.Л. Чубаров, М.М. Немирович-Данченко</i> ).....	213–214
Закон продуктивности землетрясений ( <i>П.Н. Шебалин, С.В. Баранов, К. Нарто</i> ).....	214–215
Роль механических напряжений в деструкции горных пород под влиянием ударной волны ( <i>И.П. Щербаков, В.И. Веттегренъ, Р.И. Мамалимов, А.В. Пономарёв</i> ).....	215–216

# ВЛИЯНИЕ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ НА ВОЗНИКОВЕНИЕ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ТЕХНОГЕННО-ТЕКТОНИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В КУЗБАССЕ

*Адушкин В.В.*

adushkin@idg.chph.ras.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

Территория Кузбасса отличается огромными (до 700 млрд т) и мелкозалегающими (от поверхности до глубины 2000 м) запасами высококачественного каменного угля, значительную часть которого составляет коксующийся уголь, который к тому же отличается сравнительно невысоким содержанием серы (например, в 5–10 раз ниже, чем в Донбассе) и возможностью его добычи не только шахтным, но и открытым способом. В связи с высоким востребованием такого угля его добыча в Кузбассе ежегодно растет и достигает в настоящее время рекордной величины на уровне 300 млн т в год. При этом ежегодно возрастают также объемы потребления ВВ при проведении взрывных работ, составляя в настоящее время более 800 тыс т в год, то есть практически половину годового потребления промышленных ВВ в стране. В результате извлечения больших объемов угля и создания дополнительной нагрузки на массив от складирования перемещенной пустой породы, постоянного виброколебательного воздействия буровых работ и движения транспортных средств, сильного динамического воздействия на массив массовых взрывов больших групп скважинных зарядов ВВ в окружающем породном массиве происходит перестройка напряженно-деформационного состояния. Такая перестройка напряженного состояния в массиве блочно-иерархического строения сопровождается образованием очаговых зон концентрации напряжений на неоднородностях, разломах и межблоковых границах. Под воздействием возрастающей техногенной нагрузки в сочетании с изначально высокой естественной сейсмической активностью в недрах разрабатываемых массивов Кузбасса наблюдается увеличение потоков наведенных техногенных сейсмических событий в широком диапазоне магнитуд от самых слабых землетрясений до сильных техногенно-тектонических с региональной магнитудой  $mb > 3$ , характеризующихся излучением сейсмической энергии больше 1 ГДж. В настоящей работе на основании анализа данных Международного сейсмического каталога ISC за двадцатилетний период 1998–2018 гг. установлена корреляция между изменениями массы потребляемых ВВ и числом возникающих сильных техногенно-тектонических землетрясений с магнитудами  $mb$  больше 3–4 и более сильных вплоть до катастрофических с магнитудами  $mb$  больше 4,5–5 (например, Бачатское землетрясение 18.06.2013 г. с величиной  $mb = 5,8$ ). Из установленной корреляционной связи между возникновением сильных техногенно-тектонических землетрясений и взрывными работами следует, что крупномасштабные массовые взрывы в условиях существующего в недрах Кузбасса напряженного состояния, образовавшегося под воздействием всей совокупности внешних техногенных факторов, могут стать триггером для разрядки такого напряженного состояния в форме сильного техногенно-тектонического землетрясения.

## **МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ ЛИТОСФЕРЫ ОРОГЕНОВ ВЫСОКОЙ АЗИИ**

*Алексеев Р.С.*

*rs.alekseev@physics.msu.ru*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва, РФ

В работе будет показана модель горообразования Гималайско–Тибетского орогена и его окружения. Основой для модели служат тектонофизические данные о напряженном состоянии сейсмоактивных областей. После проведения тектонофизической реконструкции напряженного состояния были выявлены определенные закономерности, которые включены в модель. Одной из важных особенностей является блочный характер деформирования коры орогенов. К таким блокам можно отнести области межгорных впадин, области крупных хребтовых поднятий (которые часто являются обрамлением первых областей), области передовых прогибов, области поднятия в виде плато. Так же в результате реконструкций были получены данные об уровне тектонических напряжений. Для составления модели были использованы данные различных авторов. Так, время начала движения Индийской континентальной плиты (примерно 60–70 млн лет назад) по [Besse and Courtillot, 1988]. В нашей модели предполагается, что на первом этапе (около 10 млн лет) океаническая литосфера, погрузившись в мантию, двигалась вдоль подошвы континентальной Евразийской литосферы. Поскольку океаническая литосфера содержит большие объемы воды, то низы континентальной литосферы постепенно ею насыщались, дренируя воду и в верхнюю подкоровую часть. Появление свободной воды на глубинах в 100 км возможно, а ее движение вдоль границ зерен запускает целый комплекс метаморфических реакций. Заметим также, что с появлением воды в нижней, а затем и верхней части подкоровой литосферы приводит к плавлению пород, в процессе которого происходит их сепарация на легкие (граниты, базальты) и тяжелые фракции. Результатом выплавки гранитов и базальтов в подкоровой литосфере Тибета ее объем увеличивается при практическом сохранении массы, что приводит к небольшому около 1 км поднятию. На этой стадии мощность коры Тибета практически неизменна, так как миграция расплава из мантии в кору только начиналась. В этот период поверхность Тибета остается достаточно плоской. Второй этап движения связан с началом отхода океанской литосферы от подошвы Евразийской литосферы и ее опусканием в верхнюю мантию при одновременном продвижении дальше на север. Следующий этап эволюции (вероятно 10–15 млн лет назад) связан с разрушением непрерывности океанической литосферы на начальном участке пододвигания, который может быть вызван замедлением движения Индийской плиты (возможно, это начало столкновения континентальной литосферы Индийской плиты и Евразии) и более интенсивным погружением ее слэба.

*Работа выполнена в рамках Госзадания ИФЗ РАН.*

---

## **БЛОКОВАЯ МОДЕЛЬ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

*Арсеньев С.А.*

*Arrsenyev@yandex.ru*

Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта, Москва, Россия

В работе рассматривается косейсмическая стадия землетрясений, в которой происходит превращение потенциальной энергии упругости в кинетическую энергию и формирование колебаний в очаге. В качестве основы мы используем фрикционную теорию землетрясений [1], полагая, что сейсмическая радиация

излучается в очаге, состоящем из двух упруго связанных блоков. На противоположной от блоков стороне разлома возникает подвижка, то есть скольжение берегов разлома с заданной скоростью  $u$ . В результате этого движения возникают колебания блоков, которые рассчитываются с помощью теории. Постановка и аналитическое решение проблемы подробно изложены в работе [1]. Конкретные вычисления проведены для базальтового блока в форме куба со стороной 560 м и для гранитного блока 574,6 м. При возникновении подвижки с  $u = 5$  м/с блоки начинают колебаться, и расстояние между блоками  $R$  уменьшается от 1 см в начальный момент времени  $t = 0$  до нуля. Затем с блоками сжимаются, в это время  $R < 0$  и колеблются, причем частота колебаний лежит в инфразвуковом диапазоне. В конечном положении блоки примыкают к друг другу ( $R = 0$ ), хотя в начальном положении они были раздвинуты на 1 см. В общем случае, конечное положение блоков зависит от начальных условий и характеристик трения. В частности, теория допускает возникновение остаточных явлений типа возникновения трещин или каньонов, или наоборот образование холмов, резких уступов (порогов) и других особенностей ландшафта на поверхности Земли после мелко-фокусного землетрясения. В работе также получены и обсуждаются сейсмограммы в виде графиков зависимости от времени скоростей и ускорений движения блоков, а также сил, действующих при землетрясении. Рассчитана эволюция диссипативной функции, кинетической  $T$ , потенциальной  $U$  и полной энергии  $E = T + U$  землетрясения. Её максимальное значение  $E_{\max} = 357,82$  Гига-Джоулей позволяет вычислить энергетический класс землетрясений  $K = \log E_{\max} = 11,55$ . Ему соответствует магнитуда по Рихтеру  $M = 4,5$ . Полученные результаты показывают, как работает машина землетрясений, и объясняют наблюдаемые особенности проявлений мелко-фокусных землетрясений на поверхности Земли.

#### Литература

1. С.А. Арсеньев // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2018. № 11 (117). С. 135–145.

---

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОТЕКТОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ И ЕЁ ОБРАМЛЕНИЯ

*<sup>1</sup>Ахметов А.Ж., <sup>1,2</sup>Макаров П.В., <sup>2</sup>Пёрышкин А.Ю., <sup>1,2</sup>Смолин И.Ю.*

*ayan.akhmetov93@gmail.com*

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Томск, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия

По геологическим данным Енисейский кряж и Якутско-Вилойская изверженная провинция существенно различаются как по геологии, так и по развитию в них геотектонических процессов. Если в области Енисейского кряжа преобладают деформации сжатий-сдвигов, то в Якутско-Вилойской изверженной провинции ярко выражены растяжения-сдвиги, обусловленные, в том числе, и вулканизмом. В работе выполнено моделирование тектонических течений в этих областях с учётом особенностей их геологического строения. Проведена оценка вида напряженно-деформированного состояния (НДС) в этих областях на основе расчётов глобальных тектонических течений в Центральной Азии как результата коллизионных процессов на границах Евроазиатской плиты (Индостан, Аравия на юге, Североамериканская плита на северо-востоке). Также выполнен расчёт локальных

современных тектонических течений этих регионов, обусловленных особенностями их геологического строения. Для более подробного исследования вида НДС Енисейского кряжа были проведены расчеты для геологических разрезов вдоль профилей «Батолит-1982» и «Шпат». Полученные результаты показали наличие областей локализованной неупругой деформации в районе надвига Приенисейского сдвиго-надвигового пояса. Также в обоих профилях полосы локализованной неупругой деформации распространяются на поверхность горного массива именно в области нахождения сибирских рек Енисей и Вельмо. Максимальные значения отрицательных горизонтальных напряжений сосредоточены в области границы Мохо. На общую картину напряженного состояния в обоих профилях существенно влияют неоднородность физико-механических свойств и кривизна слоев земной коры. В Якутско-Вилюйской изверженной провинции выявлены заметные растяжения-сдвиги, обусловленные их геологическим строением и особенностями регионального вида НДС.

*Исследования выполнены в рамках проекта № 53 «Численное моделирование плавления в земной коре и литосфере при растяжении и коллизии (на примере Сибирской платформы и её обрамления)», комплексной программы фундаментальных исследований СО РАН «Междисциплинарные интеграционные исследования на 2018–2020 гг.».*

---

## ЭТАПЫ ФОРМИРОВАНИЯ РАЗЛОМНОЙ ЗОНЫ ПРИ СДВИГЕ ПО ПРОСТИРАНИЮ И СОПУТСТВУЮЩИЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

<sup>1,2</sup>Бакеев Р.А., <sup>1,2</sup>Степанов Ю.П., <sup>3</sup>Кочарян Г.Г.

yu\_st@mail.ru

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН), Томск, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН), Новосибирск, Россия

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук (ИДГ РАН), Москва, Россия

Скорость деформации, а соответственно и смещений по разрыву, зависит от скорости разупрочнения в результате накопления повреждений и снижения сцепления, а также величины и закона изменения трения. При этом величина смещения определяется протяженностью разрыва, накопленной энергией и внешними условиями. Таким образом, динамические явления связанные как с формированием, так и развитием разрыва зависят от множества факторов, в число которых входит строение и этап эволюции разломной зоны. В работе представлены результаты численного исследования формирования магистрального разлома и оперяющих разломных структур в осадочном чехле в условиях продольного сдвига блоков фундамента (strike-slip). Выполнен анализ влияния гравитационных и локальных тектонических напряжений, а также прочностных свойств среды на строение и этапы развития цветковых структур нарушений и магистрального разлома, влияние соотношения субгоризонтальных напряжений на вертикальное движение центральных блоков над разрывом в основании. Показано, что в условиях сдвига по простиранию можно выделить несколько этапов формирования и развития разрыва. На каждом из этапов последовательно формируются отдельные зоны

нарушений с разной скоростью деформации. Начальные этапы характеризуются наиболее плавным развитием деформации, в ходе чего происходит зарождение множества нарушений в вершине разлома в основании осадочного чехла, а также формированием полос локализации в поверхностных слоях. По мере увеличения смещения происходит рост оперяющих структур от стыка блоков в основании к поверхности. Скорость деформации существенно возрастает в момент их выхода на поверхность и формирования оперяющих структур. На следующем этапе происходит дальнейшее смещение вдоль оперений, как правило, сбросового типа. Форма оперяющих нарушений и магистрального разлома определяется как начальным напряженным состоянием, так и упругопластическими свойствами среды. Заключительной стадией является замыкание разломов верхней и нижней частей по всей высоте и формирование магистрального разлома на заключительной стадии процесса. Этот этап характеризуется наибольшей скоростью деформации и смещения вдоль всего разрыва. Моделирование осуществлялось в трёхмерной постановке, решалась система уравнений динамики упруго-хрупкопластической среды. Неупругое поведение среды описывалось в рамках модифицированной модели Друкера-Прагера-Николаевского с неассоциированным законом течения.

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

---

## ОЦЕНКА МАГНИТУДЫ ПОВТОРНЫХ ТОЛЧКОВ ПОСЛЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 2018.01.09, М3.4 В ХИБИНСКОМ МАССИВЕ

<sup>1</sup>*Баранов С.В.,* <sup>2</sup>*Шебалин П.Н.,* <sup>1</sup>*Ганнибал А.Е.*

*bars.vl@gmail.com*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Апатиты, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук, Москва, Россия

Рассматривается оценка вероятности повторных толчков после природно-техногенного землетрясения 2018.01.09 в 03:01:01:00.34 UTC с М3.4 в Хибинском массиве. Сущность модели заключается в представлении афтершокового процесса произведением законов Гутенберга-Рихтера и Омори-Утсу. Затем, предполагая, что число афтершоков на временном интервале имеет распределение Пуассона, и просуммировав по формуле полной вероятности все варианты, мы получили распределение вероятности магнитуды сильнейшего афтершока (M1) в виде двойной экспоненты. За оценку M1 принимается мода этого распределения. Полученное распределение зависит от параметра  $b$  (наклон графика повторяемости) закона Гутенберга-Рихтера и параметров  $c, p$  закона Омори-Утсу. При этом закон Омори-Утсу определяет ожидаемое количество представительных афтершоков – параметр распределения Пуассона, а закон Гутенберга-Рихтера задает распределение магнитуд суммируемых вариантов. Проверка модели на афтершоках землетрясения в Хибинском массиве выполнялась по следующей схеме. Параметры модели ( $b, c, p$ ) оценивались по данным за  $0.25 + k$  суток после основного толчка ( $k = 1, \dots, 31$ ) методом Байеса с использованием данных об афтершоках, которые уже произошли в указанный период. Оценка M1 выполнялась для времени от  $0.25 + k$  до 53 суток после основного толчка. Тестиировалось два способа оценивания параметров: (1) без априорной информации; (2) с использованием априорной информации о вероятных значениях параметров, полученных при анализе эмпирических распределений афтершоковых последовательностей, выделенных из глобального каталога землетрясений ANSS ComCat Геологической службы США (USGS). В

качестве априорной информации предполагалось, что параметры модели имеют распределения Гаусса со следующими характеристиками: для параметра  $b$  среднее значение 1.12, стандартное отклонение 0.3; для параметра  $p$  среднее – 1.05; стандартное отклонение – 0.15; для параметра  $\lg(c)$  среднее –1, стандартное отклонение 0.74. Расчеты показали: для способа (1) средняя разность наблюденных и оцененных значений магнитуды сильнейшего афтершока по всем временным интервалам равно 0.1, стандартное отклонение – 0.2; максимум модуля разности – 0.6; для способа (2) средняя разность – 0, стандартное отклонение – 0.1; максимум модуля разности – 0.3. При оценивании параметров по данным в моменты времени до 5 суток после основного толчка отклонение оцененных по способу (1) значений  $M_1$  от наблюденных значений больше, чем для оценок по способу (2). То есть, при оценивании параметров модели при малом количестве исходных данных априорная информация определяет точность прогноза. Таким образом, использование априорной информации о значениях параметров модели позволяет значительно улучшить прогноз по сравнению с оценками, получаемыми с помощью параметров, полученных без априорной информации. Применение предложенного метода показало возможность его практического использования для оценивания магнитуды повторных толчков после природно-техногенных землетрясений в условиях Хибинского массива.

*Работа включает результаты выполнения госзадания КоФ ФИЦ ЕГС РАН № 007-00186-18-00 (расчеты по способу 1), проекта, поддержанного РФФИ (№ 19-05-00812; расчеты по способу 2).*

---

## ГОРНЫЕ РАБОТЫ КАК ТРИГГЕР ТЕКТОНИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

**Батугин А.С.**

as-bat@mail.ru

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»), Москва, Россия

Горные удары при разработке месторождений известны с конца 19-го века. Если первоначально они рассматривались исключительно как авария на шахте, то с первой половины 20-го века сильные горные удары, происходящих за пределами шахтных полей, стали связывать с наличием крупных тектонических разрывных нарушений. В СССР в 1970-х годах в связи с исследованиями на Ткибули-Шаторском месторождении в Грузии появился термин «горно-тектонический удар», под которым понимали горный удар, вызванный приходом сейсмической волны от землетрясения. В работах по геодинамическому районированию возникновение удароопасной ситуации на шахтах связывалось с расположением месторождения в геодинамически опасной зоне на границе крупных блоков земной коры. Реактивация тектонических нарушений во время горных ударов стала рассматриваться как результат взаимодействия тектонических и техногенных полей напряжений. В ряде случаев направление смещений по крупным нарушениям (на месторождениях Урала, Таштагола, на месторождениях в Китае) во время сильных горных ударов увязывается именно с тектоническим полем напряжений. Это позволяет рассматривать такие горные удары как реализацию тектонического процесса, а ведение горных работ как его триггер. Выполнен анализ соотношений размеров очаговых зон горных ударов, произошедших со смещением крыльев тектонических нарушений, и структурных элементов земной коры в районе месторождения. Этот анализ показывает, что подготовка крупных геодинамических явлений

происходит в блоках земной коры, имеющих значительные размеры (до десятков и даже сотен километров) и участвующих в самостоятельных тектонических движениях. На примерах сильных горных ударов и техногенного Бачатского землетрясения показано, что триггерный эффект горных работ в реализации тектонического процесса может быть объяснен наличием предельно напряженного состояния горного массива в верхней части земной коры.

---

## ОСОБЕННОСТИ СТАРТА И ОСТАНОВКИ РАЗРЫВА НА РАЗЛОМАХ С ГЕТЕРОГЕННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

**Батухтин И.В., Будков А.М., Кочарян Г.Г.**

gevorgkidg@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер РАН, Москва, Россия

В докладе представлены результаты анализа полевых наблюдений, лабораторных экспериментов и численных расчетов в которых изучались закономерности процесса скольжения вдоль гетерогенной поверхности разрыва. Косейсмические перемещения локализуются вдоль узкой поверхности скольжения, которая располагается либо внутри зоны магистрального разрыва, либо на границе вмещающих и измененных пород. Свойства геоматериала в окрестности зоны скольжения не однородны, а варьируются в широких пределах. Одним из наиболее важных является наличие областей, выполненных геоматериалами с разной динамикой фрикционных характеристик в процессе скольжения – участков разупрочнения, упрочнения и почти нейтральных по отношению к скорости и смещению. Размеры и фрикционные характеристики таких «пятен» определяют высокочастотную часть спектра излучения, то есть параметры сильных движений в окрестности очага. Динамическая подвижка всегда начинается на участке, обладающем свойством скоростного разупрочнения. Разрыв распространяется по напряженному тектоническому разлому или до участка обладающего свойствами скоростного упрочнения, или до пересечения с другим структурным нарушением. Для распространения сейсмогенного разрыва необходимо, чтобы имело место определенное соотношение между жесткостями массива и разлома. Участок скоростного упрочнения является либо зоной с пониженными значениями эффективных напряжений нормальных к плоскости разлома, либо выполнен соответствующим геоматериалом. Длина разрыва и, соответственно, низкочастотная часть спектра излучения, а, следовательно, и такие параметры, как сейсмический момент и магнитуда на большом расстоянии, определяются либо макроструктурой массива горных пород (взаимное расположение существующих разломных зон), либо расположением на поверхности скольжения областей, обладающих свойством скоростного упрочнения (свойства геоматериала). Для старта подвижки в очаге землетрясения определенной магнитуды необходимо, чтобы размеры участка скоростного разупрочнения превышали величину, которую в настоящее время оценить можно лишь очень приблизительно – порядка 1% от длины разрыва будущего землетрясения (10 м для события с магнитудой  $M = 4$ , энергетическим классом  $K = 10.8$ ). Чем выше суммарная доля участков с разупрочнением, тем выше доля излучаемой энергии.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИДГ РАН (проект № 0146-2019-0001) и поддержана грантом РФФИ (проект №19-05-00378).*

## **РАДИОВОЛНОВАЯ ДИАГНОСТИКА ЗОН ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ В БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЕ**

**Башкунев Ю.Б., Хаптанов В.Б., Дембелов М.Г.**

buddich@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, Россия

Актуальность работы определяется тем, что в пределах Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) целенаправленных исследований зон тектонических нарушений и их геоэлектрических разрезов радиоволновыми методами почти не проводилось. Цель исследований – выявление и изучение зон тектонических нарушений земной коры в СДВ-ДВ и УКВ диапазонах радиоволни по данным измерений методами радиоимпедансного и георадарного зондирований. Рассмотрены результаты комплексирования СДВ-ДВ и УКВ методов радиоволновой диагностики зон тектонических нарушений сейсмоактивной Байкальской рифтовой зоны в районах Тункинской впадины, южного Байкала и озера Котокель в широком диапазоне радиоволн (от десятков килогерц до единиц гигагерц). Радиоимпедансное профилирование и зондирование в СДВ-ДВ диапазонах позволило обнаружить и локализовать разломы в земной коре по изменению импеданса и геоэлектрического разреза. Георадиолокация разломных структур в УКВ диапазоне сделала возможным дифференцировать тонкую структуру тектонического нарушения вплоть до отдельных сейсмодислокаций в осадочных и кристаллических породах и определить кинематику движений в разломной зоне. Использованные методы дополняют друг друга и позволяют объективно и количественно описать объект исследования. Комплексирование различных методов радиоволновой диагностики дает более подробную информацию о структуре зоны тектонических нарушений. Полученные результаты и разработанные методики радиоимпедансного и георадарного зондирования и профилирования неоднородной подстилающей среды могут быть использованы при сейсмологических и инженерно-геологических изысканиях в восточных и северных районах России.

*Доклад подготовлен по гос. бюджетному проекту «Распространение радиоволн в неоднородных импедансных каналах».*

---

## **АНАЛИЗ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ПОЛЕЙ ИОНОСФЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО ВЕРОЯТНОСТНОЙ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ**

**Беккер С.З., Ряховский И.А.**

susanna.bekker@gmail.com

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

К настоящему моменту накоплен большой объем теоретических оценок и экспериментальных данных о протекающих в ионосферной плазме процессах и о пространственном распределении концентраций ее составляющих, однако точность предсказания поведения параметров ионосферы, в том числе невозмущенной, в некоторых гелиогеофизических условиях мала. Результаты многолетнего непрерывного мониторинга радиофизических характеристик сигналов СДВ диапазона свидетельствуют о существовании значительных вариаций амплитуды и фазы радиоволны даже в спокойных гелиогеофизических условиях. Наблюдаемые вариации свидетельствуют о непрерывном изменении ионосферных параметров, что говорит о необходимости описывать параметры среды функциями

плотности вероятности, а не медианными значениями. Функции плотности вероятности ионосферных параметров (в первую очередь, электронной концентрации) могут быть использованы при расчете плотностей вероятности амплитуды и фазы волны на выбранных трассах и частотах в различных условиях солнечной и магнитной активности, на разных широтах, в различные сезоны и времена суток. В основу вероятностной плазмохимической модели положена система дифференциальных уравнений ионизационно-рекомбинационного цикла D-области ионосфера, в которой варьируются входные параметры: скорость ионизации  $q$ , температура нейтралов  $T$ , концентрации  $[O_2]$ ,  $[N_2]$ ,  $[H_2O]$ ,  $[O_3]$  и  $[CO_2]$ . Для определения законов распределения варьируемых параметров была проведена статистическая обработка экспериментальных банков данных  $T$ ,  $[O_2]$ ,  $[N_2]$ ,  $[H_2O]$ ,  $[O_3]$  со спутника AURA и данных  $[CO_2]$  со спутника TIMED за несколько лет. Рассматривались 4 сезона: зима (ноябрь, декабрь, январь, февраль), весна (март, апрель), лето (май, июнь, июль, август), осень (сентябрь, октябрь), в качестве дневного и ночного времени приняты соответственно часы освещенной и неосвещенной ионосферы (зависящие от трассы и сезона). Для всех комбинаций гелиогеофизических условий в диапазоне высот  $50 \text{ км} \leq h \leq 85 \text{ км}$  были получены функции плотности вероятности температуры и плотности нейтральной атмосферы, а также концентраций малых нейтральных составляющих. Для оценки  $q$  были рассмотрены основные источники ионизации D-области. Далее согласно полученным распределениям генерировалось  $N$  высотных профилей параметров ( $N$  определяется сходимостью ряда функций плотности вероятности каждого из параметров), и с ними решалась выбранная система уравнений ионизационно-рекомбинационного цикла. Сравнительный анализ полученных медианных и наиболее вероятных значений  $Ne$  показал, что на некоторых высотах они могут существенно отличаться друг от друга в зависимости от выбранных гелиогеофизических условий. То есть функции плотности вероятности  $Ne$  (как и остальных нейтральных и заряженных составляющих D-области ионосферы) в общем случае не подчиняются нормальному закону распределения. Отсюда сделан вывод, что медианными значениями (и тем более средними) невозможно корректно описать среду, и поэтому необходим переход к функциям плотности вероятности.

---

## О ВЛИЯНИИ ВОЗМУЩЕННОСТИ МАГНИТОСФЕРЫ НА РОТАЦИОННЫЙ РЕЖИМ ЗЕМЛИ

*Белашов В.Ю., Насыров И.А.*

*vybelashov@yahoo.com*

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

На основе анализа гелиогеофизических данных за период с 1927 по 2017 гг. подтверждается обоснованность ранее высказанной гипотезы о солнечном (через изменения глобальной магнитной возмущенности) управлении ротационным режимом Земли. Показано, что переменный по своим характеристикам поток солнечной плазмы (солнечный ветер), взаимодействуя с магнитосферой, передает ей часть своей энергии, которая в совокупности с энергией, запасенной в силу явления униполярной индукции в хвосте магнитосферы и время от времени освобождающейся, вызывает посредством эффекта обращенного МГД-генератора переменного тока изменения угловой скорости вращения Земли. Подтверждено, что предложенный ранее механизм взаимодействия внешнего магнитного поля и постоянного поля, жестко связанного с Землей, является энергетически значимым. Колебания продолжительности суток хорошо коррелируют с изменениями

солнечной активности и глобальной возмущенности магнитосферы как в 11-летних, так и в годовом и полугодовом циклах; наблюдается в целом устойчивая отрицательная корреляция изменений продолжительности суток с месячными суммами полярностей секторов межпланетного магнитного поля. Изменения барико-циркуляционного режима, а также процессы деформации земной коры (глобального характера) и перераспределение плотности в теле Земли, выдвигаемые рядом исследователей, ввиду наблюдающейся корреляции этих явлений, в качестве причин колебаний угловой скорости вращения Земли, являются следствием неравномерного вращения планеты. Указаны возможные пути экспериментального подтверждения полученных результатов. Так, для выяснения действительного вклада изменений магнитосферной возмущенности в колебания продолжительности суток посредством натяжений магнитного поля необходимы измерения поля на высотах плазмосферы за достаточно продолжительный период, включающий (в идеале) 22-летний цикл солнечной активности. Для определения величины вклада освобождаемой спусковым механизмом энергии, аккумулированной в магнитосфере, необходимы экспериментальные измерения вектора магнитной индукции в хвосте магнитосферы за период, включающий, по крайней мере, несколько «срабатываний» спускового механизма.

*Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.*

---

## ИОНОСФЕРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ НАД НОВОСИБИРСКОМ ВО ВРЕМЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА АЛТАЕ

**Белинская А.Ю., Ковалев А.А.**

BelinskayaAY@ipgg.sbras.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им.А.А.Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия

На Геофизической обсерватории «Ключи» (ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск) ведутся комплексные геофизические наблюдения, в том числе и ионосферные. В настоящее время накоплено множество свидетельств того, что в период подготовки сильных землетрясений в различных очаговых зонах резко возрастает изменчивость ионосферы. Используя результаты многолетнего мониторинга, были исследованы возможные эффекты землетрясений (в том числе и в период подготовки) на ионосферу над Новосибирском. Рассмотрены землетрясения с магнитудой  $M > 3.5$  и удаленностю эпицентра от обсерватории «Ключи» не более 1000 км в период с 2000 по 2018 года. Проанализированы вариации критической частоты и высоты слоя F2, а также появление спорадических слоев. Для выявления ионосферного эффекта дополнительно привлечены данные ионосферных станций в р.п. Коченево, Новосибирская обл. (Западно-Сибирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды), удаленной от нашей обсерватории на 60 км, и в г. Томске (Томский государственный университет), которая расположена на 300 км севернее Новосибирска. События рассматривались с учетом геомагнитной обстановки, сезона, магнитуды и глубины эпицентра землетрясения. Отдельного рассмотрения потребовал случай техногенного землетрясения 18.06.2013 г. с эпицентром в менее, чем 300 км. от Новосибирска. Для каждого землетрясения были вычислены отклонения от медианных часовых значений за несколько дней до и после события. Анализ вариаций ионосферных параметров показал наличие

характерных отклонений для некоторых из рассматриваемых землетрясений. Полученные результаты основаны на рассмотрении известных землетрясений, поэтому по-прежнему остается открытым вопрос о выделении сейсмогенных возмущений на фоне общей изменчивости ионосферы.

---

## **МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗ ТРИГГЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ, ИНИЦИИРУЮЩИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ**

**Бенкендорф О.В., Лебедев С.В., Боков В.Н.**

e-mail: viki333@rambler.ru

Центр геофизических прогнозов «Градиент», Санкт-Петербург, Россия

Сегодня сейсмологи считают, что землетрясения возникают под влиянием триггерных эффектов. Известны различные триггерные воздействия на землетрясения. Например, воздействие сейсмической поверхности волны Релея, электромагнитный механизм возбуждения сейсмичности, деформации земной поверхности, вызываемой сопряженными антициклонами и циклонами. Мониторинг волны Релея достаточно надежен, а мониторинг электромагнитного механизма возбуждения сейсмичности связан с многими проблемами. Мониторинг для обоих перечисленных триггеров лишен прогностической составляющей, что практически сводит к нулю прогноз триггерных эффектов и соответственно землетрясений. Однако мониторинг деформации земной поверхности, вызываемой сопряженными антициклонами, очень надежен и содержит прогностическую составляющую, что позволит (в зависимости от качества прогностических метеорологических полей) составлять как прогноз триггерных эффектов, так и землетрясений за 2–3 суток. В этом случае, атмосферные триггерные эффекты реализуются через различные наборы странных атTRACTоров, которые представляются атмосферно-циркуляционными предвестниками (АЦП). Ежедневный мониторинг прогностических метеорологических полей позволяет выявить возникающие АЦП для территории Земли и, в соответствии с пространственно-временными изменениями странных атTRACTоров, определить точку бифуркации, то есть координаты, а также время землетрясений. Сила землетрясений определяется точнее при наличии дополнительных измерений геофизических предвестников. В качестве дополнительных геофизических предвестников возможно использовать измерения литосферных газов (радона, торона), геоакустических шумов, измерения GPS, уровня подземных вод и других. Необходимым условием успешного применения данных мониторинга геофизических предвестников является наличие пространственной оптимальной сети наблюдений. Совместный анализ АЦП и данных мониторинга геофизических измерений в оперативном режиме поднимет уровень оправдываемости прогнозов до практического применения

---

## **АНАЛИЗ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ФОНА ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ**

**Беседина А.Н.**

besedina.a@gmail.com

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

Одним из возможных методов мониторинга напряженно-деформированного состояния (НДС) потенциально опасных разломных зон является контроль параметров низкочастотного сейсмического фона. В лабораторных экспериментах были

подтверждены предположения о том, что при переходе очаговой области будущего землетрясения в метастабильное состояние механические характеристики разломной зоны существенно изменяться. Было ранее показано, что эффект снижения жесткости контакта обязан своим происхождением именно старту прерывистого скольжения. Обнаруженный эффект дает основания полагать, что изменения НДС разломной зоны на заключительной стадии подготовки процесса динамического скольжения могут быть обнаружены при анализе параметров низкочастотного микросейсмического шума. Одним из наиболее благоприятных для определения значений, характерных для изучаемого региона, является участок записи во время и после прохождения поверхностных волн от далеких землетрясений. Эти колебания с периодом в несколько десятков секунд обладают значительной амплитудой и длительностью, что способствует возбуждению резонансных колебаний блоков. По данным сейсмических каталогов проведена выборка землетрясений для регионов Чили и Суматра, способных возбудить резонансное колебание блоков, а также пар землетрясений, произошедших последовательно. В этом случае первое событие рассматривается как инициирующее возбуждение резонансных колебаний блоков, а перед вторым событием наблюдается смещение спектрального пика, соответствующее снижению жесткости колебательной системы перед переходом системы в метастабильное состояние. Проведенный анализ записей землетрясений в исследуемой области позволил выделить за последнее десятилетие пару землетрясений для каждого региона: (i) первое удаленное землетрясение – 2010-02-26 Mw 7.0, Япония, последующее за ним региональное 2010-02-27 Mw 8.8, Чили; (ii) первое удаленное землетрясение 2009-09-29 Mw 8.1, острова Самоа, последующее за ним региональное 2009-09-30 Mw 7.6, Южная Суматра. Для количественной характеристики микросейсмического фона и оценки характерной частоты собственных колебаний был использован алгоритм центра масс. Проводилась оценка спектрального центроида, который указывает, где, главным образом, сосредоточена энергия колебаний. Для каждого события отмечено снижение спектрального центроида после прихода волн от первого далекого землетрясения, которое продолжалась до второго регионального землетрясения. Также проведен анализ параметров микросейсмического шума для рассмотренных регионов для тех лет, в течение которых произошли рассматриваемые землетрясения.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 18-05-00923).*

---

**ОТКЛИК ВОДОНАСЫЩЕННОГО КОЛЛЕКТОРА  
НА ПРОХОЖДЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН  
В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ МАССОВОГО ВЗРЫВА В ШАХТЕ**  
**Беседина А.Н., Горбунова Э.М., Остапчук А.А., Павлов Д.В.**

dprav123@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

Одним из важных аспектов влияния горных работ на напряженно-деформированное состояние горного массива является возможное изменение гидрогеологического режима. В 2018 году был опробован новый вид мониторинга – прецизионные измерения динамических изменений уровня воды в наблюдательной скважине, обусловленных воздействием массового взрыва на горном предприятии. Измерения проводились в наблюдательной скважине № 632, расположенной в г. Губкин Белгородской области, на территории АО «Комбинат КМАруд» над Стретенской залежью шахты им. Губкина. Скважина имеет общую глубину 141 м. Она

вскрывает архей-протерозойский комплекс сложно дислоцированных скальных пород, в пределах которого проводятся горнoproходческие работы. Подземные воды трещинно-пластового типа приурочены к верхней зоне экзогенного выветривания железных руд и окисленных кварцитов. Уровень воды в наблюдательной скважине на момент начала измерений отмечался на глубине 83.41 м от свободной поверхности. Измерения проводились датчиками трех типов: уровня воды, атмосферного давления и трехкомпонентным сейсмометром, который был установлен на поверхности недалеко от устья скважины. По данным многолетнего прецизионного мониторинга уровня подземных вод, проводимого на территории Геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево», нижний порог чувствительности для водоносных горизонтов платформенных территорий составляет 0.1 мм/с. Для достоверной регистрации гидрогеологического отклика при проведении взрывных работ необходимо, чтобы источник колебаний находился на расстоянии не более 1–3 км от скважины. Для измерений был выбран взрыв в шахте, когда одна из взрывных камер оказалась расположена экстремально близко к наблюдательной скважине. Расстояние от датчика уровня воды, который был опущен в скважину на глубину 85.5 м от свободной поверхности, до «кровли» камеры, в которой было взорвано около 10 т взрывчатого вещества, составило всего 120 м. Результаты измерений показали, что максимальная амплитуда изменения уровня воды оказалась примерно на два порядка выше соответствующего значения вертикального смещения грунта в сейсмической волне на поверхности массива. Это свидетельствует о возможности инициирования вторичных гидродинамических эффектов во флюидосодержащем коллекторе, таких как, например, постепенное «размывание» коллоидных пробок, приводящее к резкому изменению давления флюида в локальных областях и возникновению его интенсивных перетоков [Brodsky et al., 2003].

Работа выполнена в рамках Государственного задания (тема № AAAA-A17-117-112350020-9) и при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-05-00809).

#### Литература

1. Brodsky, E.E., E. Roeloffs, D. Woodcock, I. Gall, and M. Manga (2003). A mechanism for sustained groundwater pressure changes induced by distant earthquakes // J. Geophys. Res., 108(B8), 2390, doi:10.1029/2002JB002321.

---

## ВОЗДЕЙСТВИЕ МОЩНЫХ КВ РАДИОВОЛН НА ВЫСОКОШИРОТНУЮ F-ОБЛАСТЬ ИОНОСФЕРЫ: РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА КОМПЛЕКСЕ EISCAT/HEATING В СЕВЕРНОЙ НОРВЕГИИ

<sup>1</sup>Благовещенская Н.Ф., <sup>1</sup>Калишин А.С., <sup>1</sup>Борисова Т.Д., <sup>2</sup>Йоман Т., <sup>3</sup>Хаггстром И. nataly@aari.nw.ru

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», Санкт Петербург, Россия

<sup>2</sup>Университет Лейсестера, Лейсестер, Великобритания

<sup>3</sup>Европейская научная ассоциация EISCAT, Киругна, Швеция

Представлены результаты комплексных экспериментов, выполненных на КВ нагревном комплексе EISCAT/Heating (г. Тромсе, Норвегия) в 2011–2016 гг. В период экспериментов мощная КВ радиоволна обыкновенной (О-мода) или необыкновенной (Х-мода) поляризации излучалась в направлении магнитного зенита на частотах в диапазоне 4.0–8.0 МГц, лежащих как ниже, так и выше критической частоты слоя F2. Эффективная мощность излучения составляла 150–850 МВт. В качестве средств диагностики эффектов воздействия мощных КВ радиоволн

на высокочиротную F-область ионосферы использовались: EISCAT радар не-когерентного рассеяния радиоволн (930 МГц) в Тромсе, когерентный КВ радар CUTLASS (SuperDARN) в Финляндии, оборудование для регистрации узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ) вблизи г. С.-Петербург на расстоянии порядка 1200 км от нагревного комплекса и ионозонд в Тромсе. Выполнено сравнение эффектов воздействия мощных КВ радиоволн обыкновенной (O-мода) и необыкновенной (X-мода) поляризации на F-область ионосферы. Детально рассмотрено поведение, условия генерации и характеристики мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН), параметров ионосферной плазмы (электронной концентрации Ne и температуры Te), ленг-мюровской и ионно-акустической турбулентностей и спектральных характеристик узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ) при O- и X-нагреве. Результаты экспериментов Арктического и антарктического научно-исследовательского института позволили впервые обнаружить возможность создания экстремально интенсивных искусственных ионосферных возмущений при X-нагреве высокочиротной F-области ионосферы. Важно подчеркнуть, что при этом возмущения в ионосфере создаются при нагреве на частотах как ниже, так и выше критической частоты слоя F2. Спектры УИРИ, зарегистрировавшиеся на значительном удалении (около 1200 км) от КВ нагревного комплекса в Тромсе, свидетельствуют о генерации разнообразных спектральных компонент при X-нагреве, таких как ионно-акустические, электростатические ионно-циклотронные и гармоники электростатических ионно-циклотронных волн (ионные бернштейновские волны). В аналогичных фоновых геофизических условиях O-нагрев не приводит к возбуждению каких-либо спектральных компонент. Обсуждаются возможные механизмы сильной модификации F-области высокочиротной ионосферы, вызванной накачкой X-волны в направлении магнитного зенита.

---

## ЭВОЛЮЦИЯ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ СУПЕРКОНТИНЕНТАЛЬНОГО ЦИКЛА: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

<sup>1</sup>*Бобров А.М.,* <sup>1,2</sup>*Баранов А.А.*

a\_m\_bobrov@yahoo.com

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук, Москва, Россия

В численных экспериментах изучена эволюция системы конвектирующая мантия – плавающие деформируемые континенты, с учетом неньютоновской реологии и фазовых переходов в мантии Земли. Используя модель с континентальной корой, континентальной литосферой и материалом океанической коры, которая может подвергаться эклогитизации, мы изучаем этапы суперконтинентального цикла и эволюцию полей напряжений в мантии и континентах в процессе цикла. Модель демонстрирует основные черты глобальной геодинамики: схождение и сжатие континентов с их последующим растяжением, разделением и расхождением; раскрытие и закрытие океанов; перестройка мантийных течений; возникновение и исчезновение зон субдукции; рециркуляция океанической коры в мантии. Наши результаты показывают, что фазовый переход на глубине 660 км, а также скачок вязкости на той же глубине, значительно воздействуют на суперконтинентальный цикл и возникающие поля напряжений. Типичные максимальные сдвиговые напряжения в мантии составляют менее 30 МПа; в зонах субдукции и на границах

континента они составляют 100–250 МПа. Перед распадом максимальное сдвиговое напряжение, генерируемое в суперконтиненте, может достигать 200 МПа. Получено, что отрыв океанических слэбов (вследствие явления падения эффективной вязкости при больших напряжениях) и их последующее относительно быстрое погружение в мантию является триггером для резкой интенсификации региональных течений в мантии. Эти вызванные погружением слэба течения, охватывают обширные регионы мантии Земли и могут вызывать стягивание континентов над этой областью; одновременно значительно возрастают значения вязких напряжений. Данный механизм интенсификации мантийных течений может являться альтернативным к механизму аваланшей, где спусковым механизмом служит накопление большого количества холодного материала над границей раздела верхней и нижней мантии на глубине 660 км.

---

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЛОКАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СЕТИ ЮГА САХАЛИНА ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ГИПОЦЕНТРИИ МЕТОДОМ СЕЙСМОТОМОГРАФИИ

<sup>1</sup>Богинская Н.В., <sup>1,2</sup>Костылев Д.В., <sup>3</sup>Ичиюнаги М., <sup>3</sup>Такахаши Х.

fly77@mail.ru

<sup>1</sup>Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, Южно-Сахалинск, Россия

<sup>2</sup>Сахалинский филиал Федерального исследовательского центра Единой геофизической службы Российской академии наук, Южно-Сахалинск, Россия

<sup>3</sup>Институт сейсмологии и вулканологии Университет Хоккайдо, Саппоро, Япония

С 2000 г. осуществляются непрерывные инструментальные наблюдения в южной части о. Сахалин локальной сетью полевых станций, состоящих из девяти автономных сейсмических станций типа DAT-4 (CloverTech, Япония) в комплекте с сейсмометрами LE-3Dlite (Lennartz electronic, Германия). Полевые наблюдения на юге Сахалина проводятся с целью выявления слабой сейсмичности наиболее густонаселенной части острова. Высокочувствительные станции позволяют вести полноценную регистрацию слабых землетрясений на юге острова, отслеживать сейсмический режим в эпицентральных зонах сильных землетрясений. Есть все основания считать данный комплекс старейшей непрерывно действующей цифровой сетью наблюдений на о. Сахалине. За двадцатилетнюю историю совершились технические средства наблюдений, оптимизировались места установок станций. Так, на начальном этапе развития сети станции многократно переносились, работали только в летний период, были сложности с обслуживанием носителей информации. Решение этих проблем позволило к 2011 году перейти на круглогодичную регистрацию и сформировать достаточно устойчивую схему размещения станций. Для о. Сахалин характерна мелкофокусная коровая сейсмичность с глубинами гипоцентров от 5 до 30 км (Уломов, Богданов, 2013). Примером проявления высокой сейсмической активности на юге острова могут служить Горнозаводское землетрясение 2006 г. с  $M = 5.6$  и Невельское землетрясение 2007 г. с  $M = 6.2$ . Высокая сейсмическая активность территории острова позволяет проводить исследования методом сейсмотомографии. Как известно, скоростная модель литосферы позволяет оценить время пути сейсмического луча от источника до регистрирующей станции. В реальности же структура Земли намного сложнее, чем ее описывает любая скоростная модель. Поэтому в рассчитанном времени пробега волны от события к сейсмической станции появляются ошибки вследствие отклонения скоростной модели от строения и свойств реальной среды. Для

сглаживания подобного рода несоответствий и корректировки гипоцентров используется метод двойных разностей [Waldhauser, Ellsworth, 2000]. В данной работе исследования проводились за период с 2007 по 2015 гг. методом сейсмотомографии TomoDD (Double-Difference Tomography), разработанным [Zhang, Thurber, 2003], с помощью которого выполняется переопределение положения гипоцентров методом двойных разностей. Для использования данного метода, прежде всего, необходима плотная сейсмическая сеть. Суть метода состоит в том, что сейсмические волны, порожденные на источниках расположенныхных близко друг к другу, распространяются до регистрирующей станции примерно по одному пути, а разность времен пробега волны от двух близких землетрясений обуславливается разностью положения гипоцентров этих событий. Метод двойных разностей переопределяет координаты гипоцентров событий. Методом [Crosson, 1976] была определена одномерная скоростная модель среды. Для дальнейшего уточнения позиции гипоцентров использовался метод Нуроми [Hirata, Matsura, 1987]. Выявлено, что относительно выбранной одномерной модели, время прохождения сейсмических волн до группы станций западного побережья медленнее, чем до группы станций восточного побережья о. Сахалин. Что, вероятно, объясняется особенностями геологического строения земной коры на пути трасс. Результаты томографии показали, что глубина гипоцентров исследуемых землетрясений увеличилась до 30–35 км. При этом отмечено, что очаги сейсмичности на западной части о. Сахалин, находятся преимущественно глубже, чем на восточной. Что соответствует результатам, полученным ранее для северной части Хоккайдо [Tamura, Kasahara, 2003].

---

## **ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РОЕВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, ВЗАИМОСВЯЗЬ С ТРИГГЕРНОЙ СЕЙСМИЧНОСТЬЮ**

**Богомолов Л.М., Закупин А.С., Каменев П.А., Богинская Н.В.**

e-mail: bleom@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт морской геологии и геофизики дальневосточного отделения Российской академии наук, Южно-Сахалинск, Россия

Сейсмические рои, которые наблюдались в южной части о. Сахалин в последнее десятилетие, обычно связывают с афтершоковым процессом, когда разрядка напряжений после главного события сравнительно небольшая. Альтернативная интерпретация – рои землетрясений отражают особый режим разломной зоны в течение некоторого времени. Интерес к роям связан также с тем, что они затрудняют исследование вопроса о влиянии сильных удаленных землетрясений на сейсмичность Сахалина. Для дальнейшего анализа этих вопросов могут быть полезны математические модели, описывающие поток событий локальной сейсмичности. В настоящее время уже разработаны подобные модели для форшоковых и афтершоковых последовательностей [Малышев, Тихонов. 1991]. Модели хорошо описывают по отдельности нарастание сейсмической активности перед главным толчком, так называемый режим с обострением («взрывной», быстрее экспоненциального, саморазвивающийся процесс по Малышеву–Тихонову и т.п.) и спадание активности афтершоков по закону Омори–Утсу. Но они не могут описать сейсмические рои, то есть пиковую зависимость от времени в силу самого характера кинетических уравнений. В презентации показано, что некоторая модификация модели саморазвивающихся процессов, а именно введение в нее отрицательной обратной связи по накоплению событий, позволяет описать всплеск сейсмической активности для роев в виде аналитического решения кинетического уравнения. Пред-

ложенная модель роя землетрясений является феноменологической, как модель саморазвивающихся процессов [1–2]. Если удастся наполнить эту модель физическим содержанием, она может быть востребована для проблемы контролируемых искусственных воздействий на очаг землетрясения. Ведь сейсмический рой может быть прообразом желательной формы реакции среды на воздействие физических полей.

#### Литература

1. Малышев А.И., Тихонов И.Н. Закономерности динамики форшок-афтершоковых последовательностей в районе Южных Курильских островов // ДАН СССР. 1991. Т. 319. № 1. С. 134–138.
2. Tikhonov I.N., Rodkin M.V. Earthquake Research and Analysis – Statistical Studies, Observations and Planning, Dr Sebastiano D'Amico (Ed.) 2012. P. 43–78.

## ЭВОЛЮЦИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ОБРАЗЦОВ МРАМОРА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ И ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

<sup>1</sup>Богомолов Л.М., <sup>1</sup>Закупин А.С., <sup>2</sup>Мубассарова В.А.,

<sup>2</sup>Сычев В.Н., <sup>3</sup>Пантелейев И.А.

e-mail: bleom@mail.ru

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, Южно-Сахалинск, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научная станция Российской академии наук в г. Бишкеке, Бишкек, Киргизия

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия

На совещаниях «Триггерные эффекты в геосистемах» в 2015, 2017 гг. представлялись результаты о деформационных зависимостях образцов мрамора в форме прямоугольных параллелепипедов при одноосном сжатии. Основное внимание было обращено на вариации скорости той или иной компоненты деформации при дополнительном воздействии электромагнитного (ЭМ) поля. В докладе продолжена обработка и интерпретация результатов этих экспериментов. Цель – получить оценки напряжений, возникающих в направлениях перпендикулярно оси главного сжатия в условиях испытания без смазки на торцах. В экспериментах проводилась непрерывная регистрация действующей нагрузки, продольного укорочения и двух компонент поперечного удлинения образцов. Изменение поперечных размеров бралось примерно посередине между торцами. Изменения размеров пересчитывались на деформации, при этом оценки продольной деформации получаются менее надежными из-за неоднородности деформации вдоль оси главного сжатия (имеется различие между зонами у торцов и около экваториальной плоскости). А поперечные деформации определяются для средней части образца. Для оценок боковых напряжений использовалась гипоупругая модель, предполагающая различные три компоненты деформаций и напряжений. В качестве известных рассматривались зависимости от времени главного напряжения (сигма-1), и поперечных деформаций (эпсилон-2, эпсилон-3). Искомыми являлись поперечные напряжения (сигма-2, сигма-3) и осевая деформация (эпсилон-1), которые определялись при решении системы из трех уравнений гипоупругости. Для минимизации различия между экспериментальной и расчетной осевой деформации в начале нагружения подбирались значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона для каждого

образца. Далее, по мере нагружения, это различие может увеличиваться, как из-за изменения модулей, так и из-за отклонений от гипоупругой модели. Последнее проявлялось по быстрому нарастанию невязки эпсилон-1 при напряжениях более 0,7–0,8 от разрушения. Для меньших напряжений также построены зависимости от времени параметра Лодэ–Надаи. Результаты дают некоторую информацию о напряженном состоянии образцов в период времени, когда наблюдался отклик акустической эмиссии на воздействие ЭМ полей (хотя было всего несколько случаев таких наблюдений при напряжениях 0,5–0,8 от разрушения).

---

## **ЭКЗОГЕННОЕ ИНИЦИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПАХ МЕХАНИЗМА ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

**Боков В.Н., Бенкендорф О.В., Лебедев С.В.**

e-mail: viki333@rambler.ru

Центр геофизических прогнозов «Градиент», Санкт-Петербург, Россия

Многолетние исследования показали, что влияние изменчивости атмосферных процессов на сейсмичность проявляется во всех диапазонах временной изменчивости. Следовательно, изменения атмосферных процессов должны инициировать и механизм возникновения очага землетрясений. Исследования по выявлению механизма возникновения землетрясений ведутся уже не один десяток лет. В основном, эти исследования основываются на теории сплошных сред и механики разрушений, что в общем позволяет оценить механизм разрушения пород в момент возникновения землетрясений. Однако в качестве физических явлений, обуславливающих подготовку землетрясений, рассматривают только тектонические и эндогенные процессы. Роль экзогенных процессов исследована очень слабо. В докладе представлены предварительные результаты влияния экзогенных процессов (изменения атмосферной циркуляции) на инициирование механизма очага землетрясений. Анализ изменения атмосферной циркуляции позволяет определить зарождение «первой» дизьюнкции для того или иного типа механизма в эпицентре очага землетрясений. Данный процесс происходит в результате чередования во времени (1–2 суток) и смены (2 суток) на пространстве положения циклонов и антициклонов с последующей их заменой. Барические нагрузки достаточно быстро меняются на противоположные. Положительные нагрузки меняются на отрицательные и наоборот. Поскольку области сжатия земной коры соответствуют областям высокого атмосферного давления, а области растяжения коры областям низкого атмосферного давления, то смена в течение 2–3 суток пространственного расположения циклонов и антициклонов позволяет уверенно выявить механизм очага – сброс или взброс. Также исследования показали, что в зависимости от расположения антициклона и циклона относительно разломов наблюдаются право-сторонние или левосторонние сдвиги.

---

## **ЭКЗОГЕННОЕ ИНИЦИРОВАНИЕ ВНЕЗАПНЫХ ВЫБРОСОВ МЕТАНА В ШАХТАХ**

**Боков В.Н., Грибанова Ю.В.**

viki333@rambler.ru

Центр геофизических прогнозов «Градиент», Санкт-Петербург, Россия

Современные представления о содержании метана в угольных пластах основываются на том, что метан находится в угле в свободном, адсорбированном и абсорбированном виде. Уголь обладает развитой трещиноватой и поровой системами.

Предполагается, что в трещинах содержится свободный метан и метан, адсорбированный на поверхности пор. Считается, что большая часть метана внедрена в межмолекулярное пространство блока угля (твердый раствор). Такое распределение метана в угле произошло как в результате метаморфизма, так и при совместном воздействии газового давления и тектонических напряжений. Существуют предположения, что, внезапные выбросы могли быть инициированы Луной. В качестве обоснования влияния Луны на выбросы в шахтах, приводят довод о синхронности взрывов в шахтах, расположенных на значительном расстоянии друг от друга. Анализ показал, что не Луна, а мощные меридиональные атмосферные процессы инициируют внезапные выбросы метана в шахтах. Пространственные изменения противоположных атмосферных вихрей вызывают нагрузки на земную поверхность и приводят к прогибу земной коры. Под влиянием антициклонального прогиба коры происходит увеличение литостатического давления на угольные пласты. При этом в окрестностях шахты, трещины содержащие свободный метан, сжимаются (закрываются). Быстрое падение атмосферного давления (циклоническое поле) «раскрывает» подвижные массы метана и обеспечивает быстрое движение массы метана по трещинам к более широким трещинам – в стволы шахт. Резкий выход опасного количества метана в шахту, в которой «перед катастрофой» приборы показывали отсутствие опасного для жизни людей количества метана», вызван ростом горизонтального градиента давления метана в шахту из соседних угольных пластов.

---

## ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ ЮЖНОЙ ЧАСТИ ХИБИНСКОГО МАССИВА

**Бондарь И.В., Маринин А.В.**

bond@ifz.ru

ФГБУН Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

Район исследования расположен на Кольском полуострове в центральной части Мурманской области в районе Хибинского палеозойского интрузивного массива. Хибинская интрузия имеет в плане форму овала размером примерно 44x35 км и площадью около 1330 км<sup>2</sup> [2]. Массив представляет собой конусообразный шток, переходящий в лопоплит. В строении Хибинского массива выделяется 8 последовательных фаз внедрения, каждая фаза имеет свой состав [1]. В Хибинском массиве расположены крупнейшие в мире запасы апатитовой руды. Одна из проблем, с которой сталкиваются геологи при добыче руды, является проблема избыточных горизонтальных напряжений. Такие напряжения существенно повышают вероятность возникновения горных ударов в подземных выработках [3]. *Методика.* Изучение избыточных горизонтальных напряжений в данной работе проводилось с помощью тектонофизических методов реконструкции напряженно-деформированного состояния (НДС): структурно-парагенетического метода Л.М. Расцветаева [4] и метода катастического анализа Ю.Л. Ребецкого [5]. Реконструкция НДС проводится по данным полевых замеров пространственной ориентировки трещиноватости, жил, отрывов, даек и зеркал скольжения. Метод катастического анализа позволяет определить количественные характеристики реконструируемых локальных стресс-состояний: положение осей главных напряжений и коэффициент Лоде–Надаи. Для реконструкции используется программа STRESSgeol. Структурно-парагенетический метод применен для анализа систем тектонической трещиноватости разных кинематических типов с их объединением в устойчивые

структурные ассоциации (парагенезы). Результаты. Рассчет проводился по замерам, сделанным в полевых работах 2009–2018 гг. Всего удалось произвести расчет для 19 локальных стресс-состояний в пределах Хибинского массива и 7 локальных стресс-состояний в его обрамлении. По результатам реконструкции установлено, что для Хибинского массива преобладают обстановки горизонтального сдвига, горизонтального сжатия и горизонтального растяжения. Причем обстановки горизонтального сдвига, горизонтального растяжения и растяжения со сдвигом отмечаются в самой южной части массива, когда как обстановки горизонтального сжатия расположены в западной и восточной частях массива, что согласуется с результатами, описанными в статье [2]. Во вмещающих породах Хибинского массива обстановки горизонтального сжатия не зафиксированы, преобладают обстановки горизонтального растяжения и сдвига. Выводы. По результатам реконструкции напряжений в пределах Хибинского массива и его обрамления зафиксированы обстановки горизонтального сжатия, горизонтального растяжения и горизонтального сдвига. В обрамлении массива обстановки сжатия отсутствуют, преобладают обстановки горизонтального сдвига и растяжения. В самом массиве обстановки горизонтального сдвига и растяжения отмечены в самой южной части, а обстановки горизонтального сжатия на восточном и западном крыле. Вероятно, это связано с развитием массива в радиальном направлении от центра к периферии.

*Исследование выполнено в рамках гос. задания ИФЗ РАН.*

#### Литература

1. Геологическая карта масштаба 1:200 000, лист Q-36-IV. Объяснительная записка. Составители: Зак С.И., Колесников Г.П. – М.: изд-во «Недра», 1964ю
2. Жиров Д.В., Маринин А.В., Жирова А.М., Сим Л.А. Неотектоника южной части Хибинского массива: результаты комплексной интерпретации противоречивых явлений // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. Т. 15. 2018. С. 140–143. DOI: 10.31241/FNS.2018.15.033
3. Ловчиков А.В. Горно-тектонические удары на Ловозерском редкометальном месторождении // Вестник МГТУ. 2008. Т. 11, № 3. С. 385–392.
4. Расцветаев Л.М. Парагенетический метод структурного анализа дизъюнктивных тектонических нарушений. Проблемы структурной геологии и физики тектонических процессов. М. : ГИН АН СССР, 1987. Ч. 2, С. 173–235.
5. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М. : Изд. Наука. 2007. – 406 с.

---

## ФОРМАЛИЗОВАННЫЙ ПРОГНОЗ ПАРАМЕТРОВ ЗАКОНА ГУТЕНБЕРГА-РИХТЕРА НА ОСНОВЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ И СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИХ ДАННЫХ

<sup>1</sup>Бугаев Е.Г., <sup>2</sup>Кишкина С.Б.

bugaev@secnrs.ru

ФБУ Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности, Москва, Россия

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

Территория исследований – фрагмент разлома Калаверс, включающий землетрясение Морган Хилл с  $M = 6.2$  (1984), который характеризуется наличием детальных и региональных сейсмологических данных. По данным геодезических наблюдений северо-западный участок фрагмента заперт, а для юго-восточного участка установлена ползучесть. Для выяснения причин, влияющих на

параметры сейсмического режима разных участков, выполнено сравнение наблюденных графиков повторяемости по сейсмологическим данным с прогнозными пределами графиков, рассчитанными на основе модели рассматриваемой территории с учетом масштаба, типа модели, условий деформирования и характера разрушения. Принята блочно-иерархическая модель, включающая области подготовки и очага землетрясений. Масштаб модели определяется максимальным размером структуры L1, ответственной за сейсмический режим рассматриваемой территории. При оценке прогнозных пределов рассмотрены модели для двух масштабов ( $L11 = 100$  и  $L12 = 50$  км); двух типов деформирования (плоская и линейная модель для всестороннего и одноосного деформирования соответственно) и разрушения (хрупкое и хрупко-пластическое). Для плоской модели и всестороннего деформирования принята минимальная скорость деформации  $G_{\min} = 1.8 \cdot 10^{-9}$  в год, а для линейной модели и одноосного деформирования принята максимальная скорость деформации  $G_{\max} = 4.1 \cdot 10^{-7}$  в год. Сравнение наблюденных и прогнозных данных позволило установить определяющую роль типа модели и характера разрушения на наклон графиков повторяемости, а масштаба и типа модели, упругого предела и скорости деформирования – на сейсмическую активность. Показано, что интегральную оценку наклона и сейсмической активности закона Гутенберга–Рихтера определяет соотношение количества очагов, сформировавшихся в условиях всестороннего и одноосного деформирования, хрупкого и хрупко-пластического разрушения. При проведении инженерных изысканий рекомендуется контролировать изменение скорости деформации и упругого предела зон вероятных очагов землетрясений для оценки возможного изменения параметров сейсмического режима и проявления характерных землетрясений, магнитуда и частота которых может существенно превышать аналогичные оценки, полученные с использованием однопараметрической модели Гутенберга–Рихтера.

---

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПОДОБЛАЧНЫХ МОЛНИЙ В КОСМОС

<sup>1</sup>Бусыгин В.П., <sup>2</sup>Кузьмина И.Ю.

irkuzmina@bk.ru

<sup>1</sup>ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России, Московская область, Россия

<sup>2</sup>АО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», Москва, Россия

В настоящее время возрастает научный и практический интерес к теоретическому и экспериментальному изучению природы образования и последствий грозовых явлений. Одно из основных направлений исследований в этой проблеме связано с глобальным космическим мониторингом молниевых разрядов. Значительная частота их наблюдения создает определенные трудности при идентификации разрядов, разрешении отдельных ударов в рамках вспышки, анализе материала совместной регистрации радиочастотных и оптических сигналов молний. С другой стороны, молниевые разряды создают оптические помехи для средств контроля оптических сигналов другой природы, поэтому в работе большое внимание уделяется выбору и анализу информативных признаков, наиболее ярко выраженных у оптических импульсов молний, в первую очередь у мощных возвратных ударов. Рассматривается роль облачности в задаче переноса импульсного оптического излучения через атмосферу земли в космос. Пространственно-временные характеристики поля излучения рассчитываются методом Монте–Карло. Изучаются особенности поведения относительной плотности

потока излучения на борту космического аппарата при облаках с оптической толщиной от долей единицы до ста единиц при зенитных углах визирования от нуля до 60 градусов. Показано, что наличие облачного слоя приводит к формированию вторичного источника на верхней границе облака и к существенному искажению временной формы исходного импульса. Получены количественные оценки характеристик регистрируемых моделей сигналов молний в зависимости от условий распространения и приема излучения.

---

## РОЛЬ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И ПЕРЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПОРОД В ИНИЦИРОВАНИИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЗЕМНОЙ КОРЕ

*Великанов А.Е.*

erdas@kndc.kz

Институт геофизических исследований РК, Алматы, Казахстан

Во многих случаях накопление сейсмотектонических напряжений в недрах Земли вызвано глубинными метаморфическими процессами, происходящими под воздействием внешних гравитационных сил. В случаях, когда огромные плотные массы осадочных пород скапливаются в глубоких впадинах, они под действием преимущественно лунно-солнечных приливных сил периодически растягиваются и подвергаются кристаллизации и перекристаллизации. Периодические растягивания способствуют образованию и раскрытию в породах новых трещин, пустот и пор, которые тут же заполняются насыщенными флюидами. В них происходит образование новых минералов, и они постепенно заполняются веществом растущих кристаллов. При этом происходит постепенное разуплотнение пород и рост их объёма. Изменяющиеся породы переходят в напряжённо деформированное состояние и начинают всё больше и больше давить во все стороны, что приводит к их постепенному или скачкообразному выпиранию наверх, начиная с самых глубоких горизонтов. Так начинается орогенный процесс и, в конце концов, бывшие впадины превращаются в огромные горные массивы и горные хребты. При этом края впадин ещё сохраняются в виде так называемых «предгорных краевых прогибов». На поверхности в центральной части таких хребтов преобладают вертикальные подвижки блоков пород, а по бортам – поднявшиеся блоки за счёт сил гравитации наклоняются и заваливаются на бок в сторону предгорных и межгорных впадин, часто возникают надвиговые структуры. В тоже время и в тех же местах на ещё больших глубинах под впадинами с плотными осадками и под образовавшимися горными массивами также происходит перекристаллизация пород кристаллического фундамента земной коры и верхней мантии. Она вызывается повышенной амплитудой приливных смещений вышележащих неоднородностей геологической среды с повышенной плотностью или увеличенным объёмом, которые периодически растягивают нижележащую твёрдую геологическую среду земной коры и верхней мантии, деформируя кристаллические решётки минералов. Это также способствует их перекристаллизации с последующим разуплотнением пород геологической среды и ростом их объёма. Периодичность многократной кристаллизации и перекристаллизации пород в недрах Земли может быть суточной, месячной, годовой. Периоды суточной перекристаллизации связаны с приливными действиями Луны на поверхность и недра Земли, когда они приподнимаются в приливном горбу и немного оттягиваются от ядерной части Земли. Общая амплитуда единовременного подъёма всей твёрдой геосферы в приливном горбу у поверхности Земли не превышает 0,5 метра. Но в активных зонах с локализованными

избыточными массами геологической среды единовременный подъём участка зоны может достигать от 1.5–2.5 до 5–8 метров. При этом создаются условия для возникновения дополнительных расширяющихся пространств внутри блоков пород, которые тут же начинают заполняться поступающими из глубин флюидами и растущими кристаллами. Затем после ослабления приливного действия Луны блоки пород начинают сжиматься, выдавливая флюиды из созданных пространств. Но до первоначального состояния они сжаться уже не могут, так как часть пространства уже заполнена растущими кристаллами пород. Поэтому процесс периодической перекристаллизации пород на глубине является сутью орогенного процесса. Периоды суточной перекристаллизации пород проходят два раза в сутки с ощущимым действием в течение шести часов. Периоды месячной перекристаллизации пород связаны с местонахождениями Луны на дневном небосклоне вместе с Солнцем, когда возрастаёт суммарная притягивающая сила действия Луны и Солнца на недра Земли. При этом происходит тот же процесс дополнительного оттягивания недр от ядерной части и возникновения дополнительного расширяющегося пространства. Периоды годовой активизации процесса перекристаллизации недр связаны с периодами приближения Земли к Солнцу и увеличением его гравитационного воздействия на недра Земли при движении по эллипсоидальной орбите вокруг Солнца.

---

## **ГРАВИТАЦИОННАЯ СВЯЗЬ СЕЙСМИЧНОСТИ С ИЗБЫТОЧНЫМИ МАССАМИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ НА ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ**

*Великанов А.Е., Аристова И.Л.*

i.aristova@kndc.kz

Институт геофизических исследований РК, Алматы, Казахстан

В докладе приводятся факты и примеры связи сейсмичности с избыточными горными массами земной коры, расположенными как на поверхности в виде различных возвышений, так и под дневной поверхностью в виде локализованных объёмов пород с повышенной плотностью. Эти связи показаны как в глобальном масштабе, так и на региональном уровне в Центральной Азии с использованием гравиметрических и геодезических данных в виде детальных карт аномалий силы тяжести в свободном воздухе и цифровых моделей рельефа, полученных по результатам высокоточных спутниковых съёмок. Подавляющее количество эпицентров землетрясений приурочено к горной местности. Чем выше относительная высота и крутизна гор, тем сильнее проявляется сейсмичность территории, выраженная в большем количестве и силе землетрясений. И чем массивнее размеры горных образований, тем значительнее глубина очагов землетрясений. Сравнение карты глобального гравитационного поля Земли (карты аномалий силы тяжести в свободном воздухе) и глобальной карты распределения сейсмичности с расположением эпицентров ощущимых землетрясений по всему миру показывают практически полное совпадение зон аномалий силы тяжести с зонами сейсмичности. Причём это совпадение наблюдается как на суше, так и в океанических глубинах, включая зоны островных дуг и срединно-океанических хребтов. На глобальной карте распределения сейсмичности видно также, что зоны сейсмичности совпадают с наиболее возвышенными формами рельефа земной поверхности и океанического дна. В целом, можно отметить, что и локализованные объёмы более плотных пород под дневной поверхностью, и горные массивы менее плотных пород на поверхности, совпадающие с аномалиями силы тяжести в свободном воздухе

и с возвышенными формами рельефа, представляют собой гравитационно возмущающие избыточные массы геологической среды, генерирующую сейсмичность. Надо понимать, что гравитационные возмущения локализованных избыточных масс геологической среды вызываются преимущественно действием лунно-солнечных приливных сил. Сейсмические станции Института геофизических исследований, Сейсмологической опытно-методической экспедиции в Казахстане, а также станции на территории прилегающих стран позволяют непрерывно отслеживать сейсмичность территории Центральной Азии. В Центре данных Института геофизических исследований создана база данных по сейсмическим событиям на этой территории с древнейших времён по 2017 г., которая содержит параметры произошедших землетрясений, включая дату, время, координаты, глубину очага, магнитуду и энергетический класс. Доступность детальных гравиметрических карт, карт цифровых моделей рельефа на обширные территории, составленных по высокоточным глобальным спутниковым съёмкам, а также наличие данных по произошедшим землетрясениям позволили более объективно оценить связь сейсмичности с возмущающими избыточными массами геологической среды на территории Центральной Азии. В процессе графического и пространственного анализа данных по сейсмичности и детальных спутниковых карт гравитационных аномалий и цифровых моделей рельефа по территории Центральной Азии показана существенная связь сейсмичности с избыточными массами геологической среды не только в сейсмичных горных районах, но и в других, менее возвышенных и равнинных асейсмичных территориях. Интенсивность сейсмичности по количеству и силе землетрясений зависит от интенсивности высотного и гравиметрического градиентов в зонах быстрого увеличения значений высоты и гравиметрического поля, а также от размеров этих зон на периферии площадей, занимаемых локализованными объёмами избыточных масс. Установлены периоды сезонной активизации сейсмичности для всех ощущимых землетрясений, связанные с периодами ускорения (март-апрель-май) и замедления (сентябрь-октябрь-ноябрь) вращения Земли при её годовом перемещении по солнечной орбите.

---

## НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ТРЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В ЛАБОРАТОРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

<sup>1,2</sup>*Веттегрен В.И.,* <sup>2</sup>*Щербаков И.П.,* <sup>1,2</sup>*Мамалимов Р.И.,* <sup>2</sup>*Кулик В.Б.,*  
<sup>1</sup>*Пономарёв А.В.,* <sup>1</sup>*Майбук З.Я.,* <sup>1</sup>*Хромов А.А.*

e-mail: Victor.Vettgren@mail.ioffe.ru

<sup>1</sup>ФГБУН Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

В 1966 г. известные американские специалисты в области физики разрушения и моделирования процессов подготовки землетрясений В. Брейс и Дж. Байерли [Brace, Byerlee, 1966] высказали предположение, что причиной землетрясений может быть повторяющаяся неустойчивость скольжения блоков горных пород. С тех пор предметом особого интереса в сейсмологии и геомеханике стали фрикционные явления на контактах в геоматериалах, в частности, при образовании трещин сдвига. Цель настоящей работы – исследовать минеральный состав поверхностных слоев пород после трения и образования трещин сдвига. Были построены установки для: получения временных зависимостей силы трения пластин из горных пород, создания трещин сдвига при сжатии цилиндрических образцов, получения

спектров триболюминесценции (ТЛ), исследования динамики ТЛ и оценки локальной температуры в зоне трения. Образцы: рифейский песчаник, гнейс, базальт, гранит, диорит, тоналит и ксенолит. Для исследования минерального состава поверхностей трения и трещин сдвига использовалась инфракрасная, рамановская и фотолюминесцентная спектроскопии. Обнаружено, что трение и образование трещин сдвига приводят к образованию глинистых минералов (каолинита, иллита, монтмориллонита и глауконита), насыщенных водой и имеющих низкий коэффициент трения. Анализ спектров ТЛ показал, что при трении кристаллические решетки минералов разрушаются и образуются электронно-возбужденные свободные радикалы  $\equiv Si - O^-$ ,  $-Si - Al^+$  и  $= Si2+$ . Они весьма активны и при взаимодействии с водой и растворенными в ней минералами могут вызывать химические реакции, приводящие к образованию глин. Эти результаты позволяют уточнить ранее предложенный механизм скачкообразности. Трение и сдвиг разрушают кристаллические решетки минералов, что приводит к образованию химически активных радикалов и ловушки, которые при взаимодействии с водой и растворенными в ней минералами инициируют химические реакции, приводящие к образованию глин. Формирование глинистой прослойки в зоне трения, по-видимому, может рассматриваться как фактор, вызывающий переключение из режима плавного роста деформации к ее скачкообразному увеличению. Пока в зоне трения не образуется слой глины, напряжение растет. В момент, когда он покрывает достаточно большую поверхность трения, сила трения резко уменьшается и возникает скачкообразный сдвиг.

---

## О ВОЗМОЖНОСТИ МОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЗЕМНОЙ КОРЕ ПО GPS НАБЛЮДЕНИЯМ

**Виляев А.В.**

*vilayev@gmail.com*

Институт ионосферы АО «Национальный центр космических исследований и технологий», Алматы, Казахстан

Исходные данные представлены результатами измерений современных геодинамических движений сейсмоактивной территории Северного Тянь-Шаня методами космической геодезии, начиная с 2009 г. По мониторингу GPS станций горизонтальные скорости движения земной поверхности определены суперпозицией соответствующих компонент векторов скоростей линейного тренда и сезонных (периодических) смещений. Скорости смещений поверхности интерпретированы как составляющие тензора деформаций. Земная кора аппроксимирована простейшей моделью сплошной однородной среды. Для расчетов напряженно-деформированного состояния (НДС) применена математическая теория механики деформируемого тела без учета факторов времени и температуры. Связь между напряжениями и деформациями принята линейной, то есть соответствующей закону Гука. Показано, что ориентация действующих деформаций совпадает с простирианием основных сейсмотектонических нарушений региона, выявленных геолого-геофизическими методами и активных в настоящее время. Выделены области одноосных сжимающих напряжений субширотного простириания, которые вызывают деформационное укорочение горных хребтов Кунгей и Заилийский Алатау с юга на север. На фоне региональных движений, сезонные вариации смещений, значительно (двукратно) изменяют амплитуду деформаций одноосного сжатия в отдельных областях. При этом субширотная ориентация оси сжатия сохраняется. Установлена пространственная корреляция между

характеристиками деформационного поля по данным GPS-мониторинга и распределением сильных землетрясений. Показано, что с учетом сезонных вариаций деформаций эпицентры сильных землетрясений пространственно совпадают с экстремумами растяжения, то есть с зонами напряжений, понижающих сдвиговую прочность пород. При этом деформирование земной коры и сейсмичность являются проявлениями единого геодинамического циклического процесса. Динамика деформаций, прослеживаемая по периодическим сезонным вариациям горизонтальных движений, может служить основой для разработки предиктора возможного землетрясения. Применение GPS наблюдений за движениями земной коры является информативным методом оценки НДС и может использоваться в целях сейсмического районирования и оценки сейсмического риска.

---

## **НЕТЕКТОНИЧЕСКАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ В КРИОЛИТОСФЕРЕ**

**Виноградов Ю.А., Федоров А.В., Виноградов А.Н.**

uavin@mail.ru

ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Обнинск, Россия

В последние годы отмечается рост интереса как в России, так и за рубежом, к региону Арктики. Значительно возросло количество сейсмических станций, установленных на арктических архипелагах. Детальное изучение сейсмичности в криолитозоне позволило выделить ряд новых источников генерации сейсмических сигналов, никак не связанных с тектонической активностью в земной коре. Было обнаружено, что процессы деструкции криолитосфера, такие как растрескивание (crevassing), аномально-быстрые подвижки (surging) пульсирующих ледников, краевое обрушение выводных ледников (calving), налагающих на поверхность моря (tidal glaciers) генерируют дискретные сейсмические сигналы, регистрируемые как особый класс сейсмических событий – так называемые «льдо-трясения». Имеются многочисленные свидетельства очевидцев и видеозаписи этих деструктивных процессов, указывающие на то, что сейсмогенные процессы сопровождаются акустической эмиссией, однако акустическому отклику деструкции ледниковых покровов в научной литературе до сих пор не удалено должного внимания. Сейсмоакустическая эмиссия генерирует волны 2 типов – сейсмические, распространяющиеся в земной коре, и акустические, распространяющиеся в атмосфере. В спектре акустических волн присутствуют инфразвуковые волны, которые в силу своей низкой частоты способны распространяться на значительные расстояния. Комплексирование сейсмического и инфразвукового мониторинга способно не только дать приращение научного знания по механизмам взаимодействия геосфер, но и продвинуться в решении прикладных задач в области безопасности жизнедеятельности и природопользования на ледниковых территориях, в частности – улучшить системы контроля опасных ледниковых подвижек на арктическом побережье и образования айсбергов на морских коммуникациях в Арктике. Архипелаг Шпицберген является идеальным полигоном для изучения процессов, связанных с движением ледников, так как там расположено более 100 ледников различной мощности, большинство из которых являются пульсирующими (то есть подвержены кратковременным подвижкам). В то же время на архипелаге Шпицберген имеется хорошая сеть сейсмических станций как российских, так и международных; хорошая доступность для организации экспедиций. Многолетний опыт работы сейсмологов Единой Геофизической службы на этом архипелаге позволил выделить основные закономерности проявления и развития сейсмических

процессов в криолитосфере, разработать оригинальные алгоритмы детектирования и локации сейсмических событий. В результате сейсмоинфразвукового мониторинга на архипелаге Шпицберген было установлено: 1. Сейсмическая эмиссия, генерируемая ледниками, имеет ярко выраженный сезонный характер. Активизация наблюдается во второй половине лета и продолжается до конца сентября. 2. Суточный ход сейсмической эмиссии совпадает с суточными вариациями температуры воздуха в приземном слое. 3. После достаточно интенсивных сейсмических событий, вызванных калвингом, наблюдаются афтершоковые последовательности, подчиняющиеся закону Гуттенберга–Рихтера. 4. Впервые в условиях архипелага Шпицберген были обнаружены сейсмоинфразвуковые события, генерируемые ледниками. События, произошедшие на краях ледников, генерируются обрушениями (*calving*). В случае, если край ледника находится в море (*tide glacier*), подобные обрушения приводят к образованию айсбергов. События, произошедшие на удалении от краев, связаны с образованием трещин (*crevassing*). Для обнаружения и определения координат сейсмоинфразвуковых событий была разработана методика, основанная на использовании сейсмических записей и данных инфразвукового мониторинга.

---

## ТРИГГЕРНЫЙ ЭФФЕКТ ПЕРИОДИЧЕСКОГО СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГОРНЫЕ ПОРОДЫ

*Вознесенский А.С., Красилов М.Н., Куткин Я.О., Тавостин М.Н., Тютчева А.О., Насибуллин Р.Р., Лучникова А.О.*

al48@mail.ru

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Горный институт, Москва, Россия

Триггерные эффекты в горных породах, заключающиеся в их разрушении или срыве контактов между отдельными блоками, рассматриваются, как правило, как следствие слабых воздействий во взаимосвязи с увеличением нагрузки при постоянной прочности. Возможны также варианты разрушения из-за постепенного снижения прочности при постоянной нагрузке. В данном докладе рассматриваются результаты экспериментов по циклическим механическим воздействиям различных видов на образцы горных пород, приводящим к усталостному снижению их прочности. Предметом изучения являлись зависимости прочности от количества циклов нагружения, а также их взаимосвязи с акустическими свойствами пород различных типов. Среди них рассматривались скорости продольных и поперечных упругих волн, а также акустическая добротность. Следует отметить, что в данных экспериментах циклические нагрузления использовались как средство увеличения нарушенности геоматериала и снижения прочности, позволяющее сократить сроки процессов деструкции, которые в реальных условиях происходят годами и десятилетиями. Исследовались периодические квазистатические (медленные) одноосные и двухосные воздействия на машинах сжатия–растяжения, а также динамические воздействия на установке с разрезными стержнями Гопкинсона. Нагружение и разгрузка в экспериментах с медленным воздействием производились в границах, нижняя из которых устанавливалась на уровне 3–5% от прочности. Верхняя граница задавалась на различных уровнях в пределах от 40 до 90% от прочности. Длительности фаз нагружения и разгрузки находились в диапазоне от единиц до нескольких десятков секунд. Скорости изменения нагрузки при этом поддерживались постоянными. При медленных нагрузлениях эксперименты проводились при

сжатии, растяжении по бразильской схеме, а также при изгибе образцов–балок. Для различных типов горных пород в первых двух случаях получены зависимости изменения как прочности образцов, так и акустических свойств от количества циклов усталостного нагружения. Показано, что для таких видов напряженного состояния горных пород характерно проявление малоцикловой усталости. То есть их разрушение происходило в пределах от нескольких единиц до первых сотен циклических нагрузений в достаточно широких границах максимальной нагрузки. Деформирование образцов балок при изгибе показало существенные отличительные признаки. В этом случае в достаточно широком диапазоне максимальной нагрузки, но не превышающей определенной величины, проявляла себя многоцикловая усталость, при которой разрушений не происходило даже при нескольких тысячах циклов нагрузений. При максимальных нагрузках, близких к прочности, происходило мгновенное, хрупкое разрушение. Диапазон максимальных нагрузок, при которых наблюдалась малоцикловая усталость, был очень узким, и для разных образцов границы этого диапазона не перекрывались друг с другом. То есть переход от режима многоциклической усталости к режиму хрупкого разрушения был очень узким и непредсказуемым. Поэтому для задания режима малоциклической усталости использовалась регистрация сигнала акустической эмиссии. Помимо прочности анализировались также изменения акустических свойств в зависимости от количества циклов усталостных нагрузений. Полученные результаты могут быть использованы при неразрушающем контроле и прогнозе разрушения массива пород вокруг горных выработок.

---

## **О СВОЙСТВАХ И ХАРАКТЕРЕ ШИРОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СТАТИСТИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ВАРИАЦИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ**

*Воробьев А.В., Воробьева Г.Р.*

*gulnara.vorobeva@gmail.com*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

Во многих современных задачах как прикладного, так и фундаментального характера, напрямую или опосредованно связанных с оценкой геомагнитной активности, понимание характера широтной зависимости основных статистических характеристик вариаций геомагнитного поля (ГМП) представляет вполне определенный интерес. Кроме этого, по типу функции, аппроксимирующей распределение плотности вероятности значений геомагнитных вариаций (ГМВ), можно судить об определяющем их физическом механизме. Так, например, в результате наблюдения суммирующего воздействия многих случайных слабо взаимозависимых величин, каждая из которых вносит малый вклад относительно общей суммы, формируется нормальное распределение; в замкнутой системе энергия ее компонентов распределяется по экспоненциальному закону или закону Лапласа (двойное экспоненциальное распределение); случайный мультиплекативный выбор нескольких параметров приводит к логнормальному распределению и т.д. При этом отдельной задачей является анализ тяжелых хвостов распределения, так как в распределениях такого рода дисперсия исследуемой величины определяется преимущественно редкими интенсивными (а не частыми небольшими) отклонениями. В ряде работ приводятся некоторые данные касательно зависимости значений параметров ГМВ от географической широты, однако все же остается не ясным ни

какую аналитическую (графическую) форму имеет данная зависимость, ни каким образом изменяется форма функции плотности вероятности от полюсов к экватору. При этом речь, как правило, идет лишь о средних значениях тех или иных параметров ГМВ, характерных для данного широтного диапазона, оперирование которыми без комплексного статистического анализа может привести к ошибочным выводам при исследовании свойств системы и ее внутренних связей. Таким образом, в настоящей работе на основании данных наблюдения магнитных обсерваторий сети INTERMAGNET, расположенных вдоль одного меридиана, исследуются широтная зависимость статистических параметров, анализируется характер изменения формы функции плотности вероятности и закона распределения для северной и восточной составляющих вариаций вектора геомагнитного поля. Зависимости, отражающие наблюдаемые закономерности, описываются в графическом и аналитическом виде.

---

## ИМПУЛЬСНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В НОЧНЫЕ ЧАСЫ

<sup>1</sup>*Воробьев А.В.,<sup>2</sup>Пилипенко В.А.,<sup>2</sup>Мартинес-Беденко В.А.*

*geomagnet@list.ru*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

В ночные часы, как на фоне суббурь, так и в магнитоспокойное время, на высокоширотных магнитных станциях часто регистрируются импульсные возмущения геомагнитного поля (MIE – magnetic impulse events). MIE – это импульсы большой амплитуды (порядка десятков–сотен нТл как по горизонтальным, так и вертикальной компонентам) с характерной длительностью 5–10 мин, локализованные в пространстве с масштабами порядка первых сотен км. Известно, что быстрые изменения геомагнитного поля могут являться причиной экстремальных значений геоэлектрических полей, и геоиндущированных токов, оказывающих негативное воздействие на линии электропередач, системы автоматики высокоширотных железных дорог и другие объекты инфраструктуры, сбои в функционировании которых сопряжены, как правило, со значительным материальным уроном народному хозяйству и снижением уровня безопасности их эксплуатации. Вариации, вызванные такими импульсными возмущениями геомагнитного поля, достигают  $\sim 30$  нТл/с, что значительно превышает вариации (10 нТл/с), вызвавшие во время магнитной бури 1986 г. как множественные локальные сбои в энергосистемах Квебека (Канада), вплоть до разрушения трансформаторов, так и нарушение высокочастотной радиосвязи по всему миру. В работе приводятся результаты сравнительного анализа статистических распределений для значений амплитуды и скорости изменения MIE-вариаций в ночные часы, зарегистрированных в течение 2016–2017 гг. на полярных и авроральных широтах на северо-востоке Канады. Рассмотрены вопросы, касающиеся частоты появления импульсных возмущений геомагнитного поля, их связи с магнитными бурями и суббурями и возможных механизмов генерации.

## ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПРОЯВЛЕНИИ СЕЙСМИЧНОСТИ В ТЕРСКО-КАСПИЙСКОМ ПРОГИБЕ

*Габсатарова И.П.*

ira@gsras.ru

Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН), Обнинск, Россия

В Альпийско-Гималайском сейсмоактивном поясе известны участки проявления мантийной сейсмичности, где происходят землетрясения, очаги которых в основном расположены в переходном к верхней мантии слое. Зона проявления заглубленных очагов ( $70 \text{ km} \leq h \leq 170 \text{ km}$ ) в центральной части Терско-Каспийского прогиба в настоящее время является предметом детального исследования в ФИЦ ЕГС РАН. Отличительной особенностью этой зоны от других зон глубокофокусных землетрясений Альпийско-Гималайского пояса является проявление относительно слабых мантийных землетрясений ( $M = 2\text{--}4.5$ ), регистрация которых длительное время находилась на пределе чувствительности редкой сети сейсмических станций. В тектоническом плане область заглубленных очагов в Терско-Сунженской зоне располагается между Северным и Владикавказским глубинными разломами. Тырныаузско-Сунженский погребенный глубинный разлом является южной границей блока, в котором происходят самые «глубокие» из них ( $h = 130\text{--}165 \text{ km}$ ). Цхинвало-Казбекский глубинный разлом делит область заглубленных очагов по диагонали на самые глубокие с  $h = 130\text{--}165 \text{ km}$  и менее глубокие с  $h = 70\text{--}120 \text{ km}$ . Терско-Сунженская сейсмогенерирующая область наиболее высокосейсмична. В 1976 г. здесь произошло Черногорское землетрясение с сотрясениями в эпицентре в 8–9 баллов и  $M = 6.4$ , а с конца XIX в. до начала XXI в. известно более 20 землетрясений, проявившихся с силой  $I_0 \geq 6$  баллов. К наиболее сильным из них относятся 8-балльное Терское (Эльдаровское) землетрясение 1912 г. с  $M = 5.7$  и очагом в верхней мантии; 7–8-балльное Веденовское 1933 г. с  $M = 5.2$ . По имеющимся данным о глубоких землетрясениях [Годзиковская, Рейснер, 1989] отмечается активизация в переходном слое к верхней мантии в исследуемой зоне при подготовке Черногорского землетрясения 28 июля 1976 г. в 20h 17m с  $M = 6.2$  [Кондорская и др., 1980]. Тогда, почти за четыре года до него, начали регистрироваться землетрясения с  $KP = 9.2\text{--}12.5$  и с глубинами  $h = 80\text{--}120 \text{ km}$ , причем, вплоть до 17 июля 1976 г. Подобный факт отмечен перед сильным коровым Курчалайским землетрясением 11 октября 2008 г. По данным последних исследований вдоль диагональной Бенойско-Эльдаровской шовной зоны и его продолжения под структуры Дагестанского клина наблюдается временной «тандем» заглубленных ( $h \geq 70 \text{ km}$ ) и верхнекоровых очагов с  $M \geq 3$ : заглубленные предваряют коровые очаги с промежутком времени от одного дня до нескольких суток, который, по нашему мнению, можно отнести к триггерному эффекту. Такое может быть связано с подъемом мантийного вещества и его влиянием на разрядку напряжений в блоках земной коры. В 2013 г. это явление проявилось наиболее явно, неоднократно, и, что важно, не только в Терско-Каспийском прогибе, а также в структурах Горного Дагестана.

# РАДИОФИЗИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ «МИХНЕВО»

*Гаврилов Б.Г., Зецер Ю.И., Поклад Ю.В., Ряховский И.А.,  
Ляхов А.Н., Рыбаков В.А., Ермак В.А.*

e-mail: boris.gavrilov34@gmail.com

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

Исследования взаимосвязанных процессов в магнитосферно-ионосферно-атмосферно-литосферной системе проводятся в ИДГ РАН с использованием современных комплексных методов, предполагающих получение координированных измерительных данных от приемников глобальных навигационных систем, радиоприемных комплексов КВ, ДВ, СДВ диапазонов, магнитометрических и электрофизических измерительных комплексов, составляющих единый радиофизический измерительный комплекс геофизической обсерватории (ГФО) ИДГ РАН «Михнево». Новые исследования показывают, что физические процессы в верхней ионосфере в существенно большей степени, чем это предполагалось ранее, зависят от процессов, происходящих в атмосфере и нижней ионосфере. В ходе исследований, использующих современные радиофизические системы для изучения состояния и динамики ионосферы и атмосферы, были развиты новые методы измерения с использованием современных ГЛОНАСС-GPS приемников, создана аппаратурная база и методический аппарат для проведения исследований влияния мелко- и среднемасштабных ионосферных неоднородностей, влияние параметров ионосферы на распространение электромагнитных сигналов, в том числе при проведении экспериментов по искусственной модификации ионосферы в экспериментах на нагревных стенах «Сура» и EISCAT-Heating. Использование новой высокочувствительной магнитометрической аппаратуры позволило впервые зарегистрировать и исследовать сигналы амплитудой в единицы фемтотесла на расстояниях до 2000 км от источника. Важным направлением исследований стало изучение влияния солнечных рентгеновских вспышек на изменения атмосферного электрического поля и распространение волн СДВ диапазона. Сформулированы и решены задачи привлечения дополнительных экспериментальных данных и современных теоретических моделей для оценки влияния высокоэнергетических геофизических возмущений на состояние и динамику верхней и нижней ионосферы: исследовано влияние геометрических факторов и алгоритмов обработки данных на параметры сигналов навигационных спутников, выполнена верификация эмпирических моделей нижней ионосферы по наблюдениям сигналов ОНЧ/КНЧ диапазона, разработана методика восстановления параметров (профиль ионизации) D-области ионосферы во время, до и после солнечных вспышек, созданы программные средства определения абсолютных значений полного электронного содержания ионосферы по данным измерений с использованием пространственно разнесенных мультисистемных приемников GPS и ГЛОНАСС, получены экспериментальные данные о вкладе ионизации нижней ионосферы в определяемое по данным ГНСС полное электронное содержание ионосферы. Путем сопоставления данных измерения полного электронного содержания ионосферы с фазовыми и амплитудными измерениями сигналов СДВ-ДВ радиостанций на глобальных и региональных трассах исследованы особенности структуры и динамики ионосферной плазмы. Анализ накопленного экспериментального материала не только позволил получить новые данные о структуре D-слоя ионосферы, но и показал возможность использования полученных данных для совершенствования и верификации программ расчета

распространения СДВ сигналов. Разработанные методы были верифицированы на большом экспериментальном материале как в спокойных геофизических условиях, так и при значительных возмущениях гелиогеофизической обстановки.

---

## ИНДИКАТОРЫ ИЗМЕНЕНИЙ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГЕОСРЕДЫ ПРИ ПОДГОТОВКЕ И РЕАЛИЗАЦИИ СИЛЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО ДАННЫМ МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕРЕНИЙ С ПОДЗЕМНЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ АНТЕННАМИ

<sup>1</sup>*Гаврилов В.А.,* <sup>2</sup>*Дещеревский А.В.,* <sup>1</sup>*Бусс Ю.Ю.,* <sup>1</sup>*Морозова Ю.В.,* <sup>1</sup>*Власов Ю.А.,*  
<sup>1</sup>*Федористов О.В.,* <sup>1</sup>*Денисенко В.П.*

e-mail: vgavr1403@mail.ru

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук, Петропавловск-Камчатский, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

Представлены результаты ретроспективного анализа данных непрерывного многолетнего мониторинга изменений удельного сопротивления горных пород в зоне Петропавловск–Камчатского геодинамического полигона. Мониторинг проводится с 2005 г. на базе электромагнитных измерений с подземными электрическими антennами. Физической основой метода является связь между изменениями влажности значительного объема горных пород и воздействующими на геосреду тектоническими напряжениями. Основным конструктивным элементом антенн являются обсадные колонны скважин. Измерения проводятся в диапазоне 25–1200 Гц по четырем частотным каналам. Расчетные значения глубин мониторинга составляют от 50 до 2250 м в зависимости от частотного диапазона измерений и расположения измерительного пункта. Основная задача проводившихся исследований связана с формированием пакета индикаторов изменений напряженно-деформированного состояния геосреды – наиболее информативных параметров, изменения которых связаны с подготовкой близких сильных тектонических землетрясений. Предполагается, что такой пакет индикаторов напряженно-деформированного состояния для Петропавловск–Камчатского геодинамического полигона будет сформирован в конечном итоге на основе данных многолетних комплексных скважинных измерений, проводимых на полигоне. В состав этих измерений в настоящее время, кроме измерений с подземными электрическими антennами, входят геоакустические измерения, а также измерения удельной электропроводности, уровня, плотности, дебита, температуры воды скважин. Приводятся результаты сопоставления данных мониторинга изменений удельного сопротивления горных пород с результатами по другим видам многолетних измерений, проводимых в зоне Петропавловск–Камчатского геодинамического полигона.

**ОТРАЖЕНИЕ ПРОЦЕССА ПОДГОТОВКИ СИЛЬНОГО БЛИЗКОГО  
ЖУПАНОВСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ (30.01.2016 г., M = 7.2, RE = 107 км)  
В ДАННЫХ КОМПЛЕКСНЫХ СКВАЖИННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА  
ПЕТРОПАВЛОВСК–КАМЧАТСКОМ ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ**

*'Гаврилов В.А., 'Морозова Ю.В., <sup>2</sup>Дещеревский А.В., 'Бусс Ю.Ю., <sup>3</sup>Пантелейев И.А.  
vgavr1403@mail.ru*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук, Петропавловск-Камчатский, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия

Сильное Жупановское землетрясение ( $M = 7.2$ ) произошло 30 января 2016 г. на эпицентральном расстоянии  $Re = 107$  км от г. Петропавловска-Камчатского на глубине 161 км. Эпицентр землетрясения располагался на суще на север от г. Петропавловска-Камчатского. Землетрясение сопровождалось сотрясениями, интенсивность которых в г. Петропавловске-Камчатском составляла до шести баллов по шкале Меркалли. По величине параметра  $S = 39\%$  указанное землетрясение было самым сильным за все время скважинных измерений на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне (с 2000 года). (Величина  $S$  определяется как  $S = L/Rh \cdot 100$ , где  $L$  – длина очага землетрясения в км при аппроксимировании формы очага эллипсом;  $M$  – магнитуда события, вычисляемая по сейсмическому моменту;  $R$  – гипоцентральное расстояние в км). Анализ данных комплексных скважинных измерений на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне показывает, что заключительная стадия подготовки Жупановского землетрясения отразилась, прежде всего, в аномальных изменениях влажности геосреды. В частности, по данным электромагнитных измерений с подземными электрическими антennами примерно за четыре месяца до землетрясения началось уменьшение удельного сопротивления в зоне полигона, а за двое суток до момента землетрясения был зарегистрирован аномально быстрый и значительный (до 700%) рост удельного сопротивления пород, означающий резкое увеличение скорости деформационных процессов в зоне Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона. Данные об аномально быстром и значительном росте удельного сопротивления пород в зоне скважины Г-1 послужили основанием для срочной подачи 29 января 2016 г. Заключения о сейсмической опасности для Камчатского края, в котором было указано, что на период с 29 января по 5 февраля 2016 г. включительно повышена вероятность землетрясений с параметром  $S \geq 12\%$ .

---

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ В ИЗУЧЕНИИ ПРИРОДНЫХ  
ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СОБЫТИЙ И ИХ ТРИГГЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ**

*<sup>1,2</sup>Гвишиани А.Д.*

*a.k@gcras.ru*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

Сегодня мы живем в мире Больших Данных (BigData). Быстро растущие в этом мире потоки внешней и внутренней информации постоянно переориентируют

приоритеты научного анализа как функцию времени. В докладе будет сделана попытка наметить ответы на возникающие в связи с этим следующие вопросы. В каком направлении развивается в наши дни мониторинг в науках о Земле и окружающей среде? Каковы сегодняшние приоритеты сбора, накопления и распознавания знаний в Больших Данных, получаемых современными системами наблюдений Земли? Какие задачи мы решаем – те, что можем сегодня решить или те, которые нужно решать? Как связаны данные наблюдений, экстремальные события, Большие Данные и системный анализ? Не находимся ли мы в ситуации, когда будучи внутри необъятного мира Больших Данных, требующего постоянных ресурсов для его охвата, мы концентрируем усилия на том, что лежит на поверхности? Иными словами, видим ли мы «лес» Больших Данных за его «деревьями»? Продвинуться в ответах на эти и другие аналогичные вопросы Больших Данных помогает активно сегодня развивающаяся наука – системный анализ. В некоторой степени это, так сказать, математика Больших Данных. Большие Данные – это гигантская система, характеризующаяся тем, что ее информация удовлетворяет принципам больших значений четырех V (4V-principal): 1. Volume (Объем). 2. Velocity (Скорость). 3. Veracity (Достоверность, точность). 4. Variety (Разнообразие). 4V – система имеет неисчислимое количество (континуум) объектов и связей между ними. Неподготовленному исследователю трудно определить с чего начать и как построить во времени и пространстве этапы исследования Больших Данных. На помощь здесь приходит системный анализ в различных его формах.

---

## РАЗЛОМНАЯ ТЕКТОНИКА И СЕЙСМИЧНОСТЬ ПРИАМУРЬЯ

*Гильманова Г.З., Меркулова Т.В.*

*gigulya@yandex.ru*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт Тектоники и Геофизики им. Ю.А.Косыгина ДВО РАН, Хабаровск, Россия

Среди разломов Приамурья, выделяемых разными авторами по геологическим данным в последние годы, преобладают в основном разломы северо-восточного направления, что вызвано высокой активностью разломов Тан-Лу в мезозойско-кайнозойское время. Исследование современной сейсмической активности показывает, что сейсмолинеаменты и зоны максимальной выделившейся сейсмической энергии иногда не согласуются с установленными на дневной поверхности разломными зонами. Для изучения зон тектонической нарушенности используются линеаменты, полученные по разнородным данным, которые прямо или косвенно отражают особенности геологической структуры разных глубинных уровней. Проведен линеаментный анализ геофизических полей и рельефа, совместно с анализом сейсмичности, с использованием программ КОСКАД-3Д [2] и WinLESSA [5], ArcGis. Кроме системы северо-восточных линеаментов получены структуры субмеридионального субширотных и северо-западного простирания. Разрывы субмеридионального и субширотного направлений проявлены в геофизических полях, отражающих строение наиболее глубинных горизонтов литосферы: региональных аномалиях гравитационного и магнитного полей, аномальных значениях отношения  $V_p/V_s$ , что свидетельствует о значительной глубине их заложения. Разломы этих направлений достаточно хорошо выражены в линеаментах по анализу рельефа. Широтные и субмеридиональные разломы являются в Приамурье активными сейсмогенными структурами, подвижки которых сопровождаются возникновением землетрясений. Они контролируют сейсмолинеаменты и зоны максимального выделения сейсмической энергии. В основном землетрясения с

$M \geq 5$  происходят на пересечениях субмеридиональных и субширотных разрывов. Скрытые сейсмоактивные разломы субмеридионального направления выделяются на сопредельных территориях: Алданском щите, северо-востоке России [1; 4]. На северо-востоке России установлена повышенная проницаемость скрытых субмеридиональных разломов для миграции глубинных флюидов в осадочных бассейнах [3]. Скрытые разрывы северо-западного направления в основном отражены в аномалиях магнитного поля и линеаментах рельефа, т.е. в структурах, которые несут информацию об особенностях строения относительно приповерхностных горизонтов литосферы. Глубинные структуры определяют и металлогеническую зональность региона и крупных рудных узлов. Субмеридиональная ориентировка месторождений и рудных тел, косо пересекающих структуры более молодого возраста отмечалась для многих объектов Приморья и Хабаровского края, что подтверждает важную рудолокализующую роль СМ и СШ линеаментов, перекрытых более молодыми породами. Геологические исследования с учетом данных по глубинным субмеридиональным и субширотным структурам могут изменить направление поисков и расширить прогноз ресурсной базы.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-00015) и в рамках государственного задания ИТиГ ДВО РАН.*

#### Литература

1. Ващилов Ю.Я., Калинина Л.Ю. Глубинные разломы и линеаменты и размещение эпицентров землетрясений на суще северо-востока России // Вулканология и сейсмология. 2008. № 3. С. 19–31.
2. Петров А.В., Юдин Д.Б., Хоу Сюэли. Обработка и интерпретация геофизических данных методами вероятно-статистического подхода с использованием компьютерной технологии «КОСКАД 3D» // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. № 2. С. 126–132.
3. Сидоров В.А., Глотов В.Е., Волков А.В. Современная гидродинамическая активность субмеридиональных зон глубинных разломов как индикатор нефтегазоносности осадочных бассейнов (северо-восток России) // ДАН. 2013. Т. 448, № 6. С. 689–694.
4. Трофименко С.В. Тектоническая интерпретация статической модели распределений азимутов гравимагнитных аномалий Алданского щита // Тихоокеанская геология. 2010. Т. 29, № 3. С. 64–77.
5. Zlatopolosky A. Description of texture orientation in remote sensing data using computer program LESSA // Computers&Geosciences. 1997. V. 23. No 1. P. 45–62.

---

## АППРОКСИМАЦИОННЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПРИ УДАРАХ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ РАЗМЕРАМИ ОТ НЕСКОЛЬКИХ МЕТРОВ ДО 3 км

**Глазачев Д.О.**

glazachevd@gmail.com

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

Разрушения и травмы, вызванные ударной волной, являются одним из наиболее важных опасных последствий ударов космических тел. В случае Челябинского события ударная волна была единственным поражающим фактором, чье действие привело к небольшим повреждениям конструкций, большому количеству разбитых окон, оконных рам и дверей. Избыточное давление и скорость ветра за фронтом ударной волны, приводящие к тем или иным опасным последствиям, могут быть оценены на основе данных о ядерных взрывах или на основе специально разработанных моделей для входа в атмосферу космических объектов. Большое число

различных сценариев входа космических тел в атмосферу Земли было рассмотрено в [Artemieva et al., 2017]. Данные этих расчетов использовались для построения масштабных соотношений для наиболее важных параметров ударной волны. Была построена модель, позволяющая оценить максимальное значение избыточного давления и распределения относительного давления (отношение давления в точке к невозмущенному атмосферному) с учетом неоднородности распределения давления на поверхности. Для всех параметров были найдены выражения, позволяющие выразить их через параметры космического объекта (размер, плотность, скорость и угол входа в атмосферу). Полученные аппроксимационные соотношения были проверены на данных Челябинского метеороида и Тунгусского события, показали хорошее соответствие с полученными данными и используются в интернет-калькуляторе, позволяющем быстро и достаточно точно оценивать различные эффекты падений. Тестовая версия интернет калькулятора расположена по ссылке <http://www.AsteroidHazard.pro>.

---

## АНОМАЛИИ ВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЙ ЕСТЕСТВЕННОГО ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ (ЕИЭМПЗ) КАК ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

*<sup>1</sup>Гордеев В.Ф., <sup>1</sup>Малышков С.Ю., <sup>1</sup>Поливач В.И., <sup>2</sup>Шталин С.Г.*

*gordeev@imces.ru*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», Томск

В Институте мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук (ИМКЭС СО РАН) разрабатываются технологии мониторинга естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ) с целью использования данного явления для оценки опасных геологических процессов (ОГП). В настоящее время, успешно используются многоканальные геофизические регистраторы типа МГР, принцип работы которых основан на регистрации интенсивности импульсного потока ЕИЭМПЗ в диапазоне ОНЧ, в автоматизированных системах контроля устойчивости оползневых склонов на трассах магистральных газопроводов ПАО «Газпром» от Кавказа до Камчатки. Предложена концепция аппаратно-программного комплекса для мониторинга разномасштабных геодинамических процессов в литосфере по параметрам временных вариаций интенсивности импульсного потока ЕИЭМПЗ с возможностью пеленгации источника сигнала. Основываясь на механизмах подготовки землетрясений, можно предположить, что волна механических напряжений от эпицентра, распространяясь во все стороны, подавляет источники механоэлектрических преобразований в местах регистрации ЕИЭМПЗ, но величина энергии этих волн иногда не достаточна для подавления напряженно-деформированного состояния горных пород, обусловленных местными геодинамическими процессами оползневого склона. Апробирован макет сети станций мониторинга разномасштабных геодинамических процессов в литосфере методом ЕИЭМПЗ, с возможностью пеленгации источника сигнала. Установлено, что метод прогноза землетрясений, описанный в патенте № 2238575 «Способ прогноза землетрясений», может быть улучшен за счет анализа новых прогностических признаков, а именно выделения ранних стадий динамического развития и определения азимута источника электромагнитного

сигнала по параметрам временных вариаций интенсивности импульсного потока ЕИЭМПЗ. Впервые зарегистрированы три стадии подготовки предстоящих землетрясений, которые произошли 05 сентября в Челябинской обл. и 06 ноября в Грузии в 2018 году не только по интенсивности импульсного потока ЕИЭМПЗ, но и, по оценке азимута принимаемого сигнала.

---

## ВЗАИМОСВЯЗЬ НЕОТЕКТОНИКИ И ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ РАЙОНА ОЛЕНЕКСКОГО ПОДНЯТИЯ

*<sup>1</sup>Гордеев Н.А., <sup>1</sup>Сим Л.А., <sup>2</sup>Суханова Т.В., <sup>1</sup>Бондарь И.В.*

e-mail: gord@ifz.ru

<sup>1</sup>ФГБУН Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

В работе представлены результаты комплексного изучения Оленекского поднятия и его южного обрамления, в комплекс вошли геологические, структурно-геоморфологические и тектонофизические методы. Территория исследования приурочена к Лено-Оленекскому междуречью на северо-востоке Восточно-Сибирской платформы. Наличие россыпных алмазов [1; 2; 7; 8] и данных об Оленекском месторождении битумов [4], а также относительно трудная доступность района обусловили необходимость детального изучения новейшей тектоники района, т.к. на сегодняшний день на район исследований имеются лишь мелкомасштабные карты неотектоники [5; 3]. Основной целью работы было сопоставление новейших тектонических структур с новейшей и современной геодинамикой района. Установление взаимосвязи древних и новейших структур. Выявление закономерностей распространения полезных ископаемых в связи с геодинамикой. Структурно-геоморфологический метод анализа вторичных нарушений, базирующийся на принципах тектонофизического моделирования [6], показал, что формирование большинства разломов, независимо от их простирания и ранга, происходит преимущественно в обстановке транспрессии. Обстановки транстенсии крайне редки и характерны лишь для новейших отрицательных структур. Анализ морфологии новейших структур в комплексе с тектонофизическим методом позволил разделить территорию Лено-Оленекского междуречья на несколько областей с разными геодинамическими обстановками формирования структур. Основными источниками, которые влияют на особенности структурного плана территории исследования, являются новейшие активно развивающиеся Оленекское поднятие и Верхоянский Хребет. На основании детального анализа линеаментов, проведенного в пределах Оленекского поднятия, установлены направления возможного сжатия, что соответствует результатам тектонофизического анализа. Общий характер распространения полезных ископаемых показал, что горючие ископаемые локализуются в зонах растяжения по северному обрамлению Оленекского поднятия, формируясь в отложениях новейших прогибов. Коренные месторождения алмазов локализуются в центре поднятия, в кимберлитовых телах, которые в новейший этап подверглись сильной эрозии. Россыпные месторождения приурочены к неогеновым поверхностям выравнивания и к ряду геоморфологических ловушек (чаще всего это место подпруживания).

### Литература

1. Граханов С.А. Рэтские россыпи алмазов, 2010.
2. Граханов С.А. Особенности формирования и закономерности размещения россыпей алмазов северо-востока Сибирской платформы: Автореферат дисс. на соиск. уч. степени доктора геол.-минер. наук Якутск, 2007.

3. Грачев А.Ф. Основные проблемы новейшей тектоники и геодинамики Северной Европы // Физика Земли. № 12. Москва. 1996. С. 5–36.
  4. Поляков А.А., Блинова В.Н., Кашиццева В.А., Смирнова М.Е. Новые данные о геологическом строении Оленекского месторождения битумов и перспективах нефтегазоносности прилегающей территории // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2011. Т. 6. № 3.
  5. Николаев Н.И. Карта новейшей тектоники СССР и сопредельных областей. М. : Мингео СССР, 1979. 1.
  6. Сим Л.А. Изучение тектонических напряжений по геологическим индикаторам (методы, результаты, рекомендации). Изв. вузов. геол. и разн. / Сим Л.А. 1991. № 10. С. 3–22. Фондовые материалы
  7. Галабала Р.О. (отв. исп.). Геологическое строение и полезные ископаемые между речьи Лены и Оленека. Отчет партии № 14 об АФГК масштаба 1 : 50 000 на площади листов К-51-19-24, 36, 48; К-52-13, 14, 25, 26, 37-39, проведенном в 1988–1992 гг. М. : 1992.
  8. Граханов С.А. Отчет о результатах прогнозно-поисковых работ на коренные месторождения алмазов в пределах Оленекского поднятия (Республика Саха (Якутия)) в 2007–2010 гг.
- 

## О ТОЧНОСТИ ОСРЕДНЕНИЯ В ПЛОСКИХ ЗАДАЧАХ STICK-SLIP И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

*Губарь А.Ю.*

e-mail: parkag@yandex.ru

ФГБУН Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

1. Тектонические землетрясения вызываются разрывом сплошности (РС) пород на достаточном протяжении вдоль активных разломов (АР) – слоев толщиной  $h_F \sim 100$  м с сильно разрушенными (трещиноватыми) флиудонасыщенными породами, где необходимо учитывать дилатансию и взаимодействие микротрециин. В действительности, протяженные РС происходят в еще более тонких ультракатастических слоях толщиной  $h_u \sim 1–10$  мм и менее. В масштабах  $h_T \gg h_F$  тектонические блоки (ТБ, зоны вне АР) могут считаться сплошными упругими (или упруго-вязкими) средами (УС), сами макротрецины – плоскими, а условия в АР, регулирующие процессы stick-slip, – граничными условиями в плоскости скольжения. Для описания движения цепочек ТБ масштаба  $L_T \gg h_T$  обычно используются различные модели цепочек уравнений движения точечных масс (УТМ), взаимодействующих между собой и параметрами состояния в АР–РС, например, модель Барриджа–Кнопова с законом трения Rate&State и другие. Возникает вопрос: насколько решения УТМ-моделей отличаются от точных решений соответствующих начально-краевых задач для УС в ТБ?

2. Пусть УС в каждом ТБ – линейная изотропная однородная плоская и содержит одну компоненту тектонического смещения  $u_i = \delta_{i1} u(x^{(1)}, x^{(2)}, t)$  вдоль АР ( $x^{(2)}$  – поперек АР). Тогда

$$u = u^{(1)}(x^{(1)}, t) + u^{(2)}(x^{(2)}, t), \quad {}^{(k)}r^2 u^{(k)} = u_{,kk}^{(k)}, \quad (k = 1, 2) \quad (1)$$

где  ${}^{(1)}r \equiv r = \partial_t$ ,  ${}^{(2)}r = {}^{(1)}r q$ ,  $q = \tau^{(2)} / \tau^{(1)}$ ,  $\tau^{(k)} = L^{(k)} / c^{(k)}$ ,  $c^{(1)} = \sqrt{\Lambda + 2G} / \rho$  и

$$c^{(2)} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

– скорости продольных и поперечных волн,  $L^{(1)}$  и  $L^{(2)}$  – продольные и поперечные размеры блока (безразмерные  $t$ ,  $x^{(1)}$  и  $x^{(2)}$  – в единицах  $\tau^{(1)}$ ,  $L^{(1)}$  и  $L^{(2)}$ ). Из (1) можно получить 6 независимых соотношений

$$V^{(k)\pm} = \pm \frac{1}{N^{(k)}} (M^{(k)} u^{(k)\pm} - \bar{u}^{(k)}) , (k=1,2), \quad {}^{(k)}r^2 \bar{u}^{(k)} = V^{(k)+} - V^{(k)-} \quad (2)$$

для 10-ти величин  $u^{(k)\pm} = u^{(k)}(1/0, t)$ ,  $V^{(k)\pm} = u_{,k}^{(k)}(1/0, t)$ ,  $\bar{u}^{(k)} = \int_0^1 u^{(k)}(x^{(k)}, t) dx^{(k)}$ ,

где  $M^{(k)} = M({}^{(k)}r)$ ,  $M(r) = \text{sh}(r)/r$ ,  $N(r) = (\text{ch}(r) - 1)/r^2$ . В представлении (1) граничные условия должны быть заданы в виде 4-х соотношений для среднеповерхностных смещений  $\bar{u}^{(1)\pm} = u^{(1)\pm} + \bar{u}^{(2)}$ ,  $\bar{u}^{(2)\pm} = u^{(2)\pm} + \bar{u}^{(1)}$  и напряжений  $\bar{\sigma}_{11}^{(1)\pm} = R^{(1)} V^{(1)\pm}$ ,  $\bar{\sigma}_{12}^{(2)\pm} = R^{(2)} V^{(2)\pm}$ ,  $\bar{\sigma}_{22}^{(2)\pm} = R^{(22)} (u^{(1)+} - u^{(1)-})$ , где  $R^{(1)} = (\Lambda + 2G)/L^{(1)}$ ,  $R^{(2)} = G/L^{(2)}$ ,  $R^{(22)} = \Lambda/L^{(1)}$ .

Для  $N > 2$  блоков с обычными условиями на внутренних границах ( $\bar{u}_n^{(1)+} = \bar{u}_{n+1}^{(1)-}$ ,  $\bar{\sigma}_{11n}^{(1)+} = \bar{\sigma}_{11(n+1)}^{(1)-}$ ) из (2) следует:

$$\sum_{j=-1}^1 (K_{nj}^{(1)} \bar{u}_{n+j}^{(1)} + K_{nj}^{(2)} \bar{u}_{n+j}^{(2)}) = 0, \quad n = 1, \dots, N-1, \quad (3)$$

где  $K_{n,\pm 1}^{(1)} = -\varphi_n^\pm \mu_{n\pm 1}$ ,  $K_{n,0}^{(1)} = {}^{(1)}r_n^2 + (\varphi_n^+ + \varphi_n^-) \mu_n$ ,  $K_{n,\pm 1}^{(2)} = -\varphi_n^\pm$ ,  $K_{n,0}^{(2)} = \varphi_n^+ + \varphi_n^-$ ,

$$\varphi_n^\pm = \frac{l_n}{l_n \eta_n + l_{n\pm 1} \eta_{n\pm 1}}, \quad \eta_n = \eta({}^{(1)}r_n), \quad \mu_n = \mu({}^{(1)}r_n),$$

$$\eta(r) = \frac{N(r)}{M(r)}, \quad \mu(r) = \frac{1}{M(r)}, \quad l_n = 1/R_n^{(1)}.$$

Цепочка уравнений (3) (плюс уравнения, следующие из условий на внешних границах) является точной, однако она требует бесконечно много начальных условий. Если для каждого блока известны лишь  $N_0$  начальных данных (например,

$\bar{u}_n^{(k)}(0)$ ,  $\dot{\bar{u}}_n^{(k)}(0)$ ,  $\bar{u}_n^{(k)\pm}(0)$ ,  $\dot{\bar{u}}_n^{(k)\pm}(0)$  и т.д.), то операторы  $K_{nj}^{(k)}$  должны быть разложены в ряды до  $O({}^{(k)}r_n^{N_0})$  в окрестности  $N^* N_0$  первых точных собственных значений, зависящих от граничных условий, из которых наиболее важны условия в АР-РС, «переключающие» slip и stick и связывающие разрыв смещений, напряжение на разрыве и другие параметры состояния АР-РС. Полученная таким об-

разом цепочка укороченных уравнений (3) также будет давать точные решения для рассматриваемых  $N^*N_0$  параметров. В моделях УТМ рассматриваются лишь средние смещения, и поэтому их решения не могут быть точными для конкретных краевых задач. Например, решения УТМ с  $N_0 = 2$  для внутренних блоков будут иметь относительную ошибку не менее 20% (!).

3. Для одного блока с  $V^{(1)\pm} = 0$ , можно положить  $u^{(1)} \equiv 0$  ( $\Rightarrow u \equiv u^{(2)}(y, t)$ ). Пусть  $u^- \equiv 0$  и рассмотрим режим slip с  $V^+ = V_f(W)$ , где  $W \equiv \dot{a} = V_p - \dot{u}^+$ ,  $V_p \sim 0.1-15$  см/год  $\tau^{(2)}$  – заданная средняя скорость смещения другой стороны АР. Тогда из (2) следуют уравнения  $\text{chr} \cdot u^+ = M \cdot V_f(W)$ ,  $M\bar{u} = Nu^+$  ( $r = {}^{(2)}r$ ), решение которых для линеаризованной  $V_f = V_{f0} - \gamma_f \dot{u}^+$  есть  $u^+ = V_{f0} + \text{Re} \sum A_k e^{r_k t}$ ,  $\bar{u} = \frac{V_{f0}}{2} + \text{Re} \sum A_k \frac{N(r_k)}{M(r_k)} e^{r_k t}$ ,

где  $r_k = -\lambda_f(\gamma_f) + i\omega_k$ ,  $\lambda_f(\gamma_f) = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{1+\gamma_f}{1-\gamma_f} \right|$ ,  $\omega_k = \{\pi(1/2+k), \text{при } |\gamma| < 1; \pi k, \text{при } |\gamma| > 1\}$ .

И, если  $|\gamma_f| < 1$ , и известны лишь  $u^+(0)$ ,  $\dot{u}^+(0)$ , то уравнения  $\frac{1}{\Omega^2} \ddot{u}^+ + \frac{2\lambda_f}{\Omega^2} \dot{u}^+ + u^+ = V_{f0}$

$\Omega = |r_1| = \sqrt{\frac{\pi^2}{4} + \lambda_f^2(\gamma_f)}$  дают точное решение  $u^+(t)$ . А решения соответствующего

УТМ (для  $u^+ = 2\bar{u}$ ):  $\frac{1}{\tilde{\Omega}^2} \ddot{u}^+ + \frac{2\gamma_f}{\tilde{\Omega}^2} \dot{u}^+ + u^+ = V_{f0}$ ,

где  $\tilde{\Omega} = \tau^{(2)} \sqrt{k/m} = \text{const}$ , ( $k$  и  $m$  – коэффициент упругости и масса), – имеют бесконечно большие (!! ) ошибки при  $|\gamma_f| \rightarrow 1$ .

*Работа выполнена в рамках гос. задания ИФЗ РАН (№ 0144-2014-0090).*

## АТЛАС АФТЕРШОКОВ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

*Гульельми А.В., Завьялов А.Д., Зотов О.Д.*

e-mail: guglielmi@mail.ru

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

Эмпирическая формула  $n(t) = k/(c + t)$  хорошо известна в физике афтершоков [Omori, 1894]. Эту формулу принято называть гиперболическим законом Омори. Она описывает уменьшение частоты афтершоков  $n(t)$  с течением времени. Известен также и степенной закон  $n(t) = k/(c+t)^p$  [Hirano, 1924; Utsu, 1961]. Параметр  $c$  для нас интереса не представляет, а вот величины  $k$  и  $p$  являются важнейшими феноменологическими параметрами, характеризующими очаг землетрясения как динамическую систему. Указанные законы не вполне удовлетворительны прежде всего потому, что на практике монотонный спад частоты афтершоков нарушается под воздействием на очаг импульсных, периодических и стохастических триггеров естественного и искусственного происхождений. Примером импульсного триггера может служить кругосветное сейсмическое эхо, а примером периодического триггера – свободные колебания Земли, возбужденные главным толчком

[Гульельми, Зотов, Завьялов, 2014]. Дополнительным фактором, приводящим к немонотонности, или, по меньшей мере, к существенному отклонению реального потока повторных толчков от гиперболического или степенного закона, является нестационарность геологической среды в очаге после главного толчка. Для преодоления этих недостатков нами предлагается заменить эмпирическую формулу Омори на дифференциальное уравнение эволюции афтершоков  $dn/dt + \sigma n^2 = 0$ . Здесь  $\sigma$  – так называемый коэффициент деактивации очага, если  $\sigma > 0$ , или коэффициент активизации очага, если  $\sigma < 0$ . Преимущество дифференциального уравнения эволюции состоит в том, что мы без труда можем учесть воздействие триггеров на очаг и влияние нестационарности горных пород в очаге, полагая, что коэффициент деактивации (активизации) зависит от времени:  $\sigma = \sigma(t)$  [Гульельми, 2016]. В докладе будет сформулирована обратная задача физики очага и будет указан способ ее решения. Сущность обратной задачи состоит в отыскании неизвестной функции  $\sigma(t)$  по заданной функции  $n(t)$ , получаемой из сейсмических наблюдений. Формально задача сводится к решению интегрального уравнения Вольтерры первого рода. По результатам решения обратной задачи можно будет создать Атлас: планируется составить из однотипных блоков, по одному на каждый главный удар. Блок содержит 3–4 листа, на которых представлена исходная информация о данном событии, результат анализа в графической форме, и краткий комментарий. Общий вывод состоит в том, что метод обратной задачи очага (ОЗО) открывает возможность по-новому подойти к анализу афтершоков, а создание Атласа на базе решения ОЗО даст новый материал для изучения очага после главного удара. В заключительной части доклада будет дано представление об афтершоке как о вероятном триггере ряда последующих афтершоков. Будет кратко рассмотрен вопрос о роли кругосветного сейсмического эха в формировании релаксационных автоколебаний Земли. Наконец, будет затронут вопрос о форшоках, кругосветное эхо которых может в ряде случаев стать триггером главного удара.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Программы 28 Президиума РАН и проекта РФФИ № 18-05-00096, а также программ государственных заданий Института физики Земли РАН.*

---

## **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОЛЯ И МЕСТНОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ НА СЕВЕРНОМ КАВКАЗЕ**

**Гусева Т.В., Крупенникова И.С., Мокрова А.Н., Розенберг Н.К.**

*guseva@ifz.ru*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН), Москва, Россия

Триггерные воздействия различной природы на геологическую систему определяют развитие геодинамических процессов, отражающихся как в деформировании и сейсмичности, так, возможно, и в их взаимодействии. Внедрение спутниковых геодезических методов и современной математической обработки в практику повторных высокоточных координатных определений позволяет отслеживать геодинамическую обстановку и ее внезапное изменение в пределах крупных геоструктур. Кавказский регион является частью подвижного Альпийско-Гималайского пояса. Это сложный геологический объект, развитие которого продолжается и в настоящее время. Ему свойственно образование складчато-надвиговой структуры с активными движениями земной коры, сложные системы разломов, вулканизм, повышенная сейсмичность. Рассмотрены результаты анализа данных повторных ГНСС (глобальные навигационные спутниковые системы) наблюдений на пунктах

геодинамических сетей Северного Кавказа и сопредельных территорий с 2004 по 2014 гг. Задача исследований заключалась в определении современных движений и деформаций земной коры в разных системах отсчета и их сопоставление с количеством выделившейся сейсмической энергии в едином временном интервале. Синхронные измерения GPS+ГЛОНАСС на пунктах геодинамической сети Северного Кавказа (между Черным и Каспийским морями) проводились способом дифференциального позиционирования в статическом режиме с использованием двухчастотных приемников. Обработка «сырых» данных выполнялась с помощью программного комплекса Bernese 5.0. Векторы скоростей горизонтального смещения пунктов в координатной системе ITRF (в основном отражающие вращение структуры вокруг полюса Эйлера) имеют северо-восточное направление и изменяются от 25 до 33 мм/год. Скорости горизонтальных смещений в пределах Северного Кавказа относительно Восточно-Европейской платформы (ВЕП) достигают нескольких миллиметров, что возможно отражает как влияние Аравийской плиты, так местных тектонических и экзогенных факторов. Рассчитан первый инвариант тензора деформаций в пределах исследуемого временного интервала. В результате получены скорости изменения площадных деформаций региона Северного Кавказа, а также прилегающих территорий ВЕП и Аравийской плиты. Наблюдается дифференцированное площадное деформирование со скоростями  $\pm 2 \cdot 10^{-8}$  в год при наличии аномальных зон сжатия и растяжения до  $\pm (10-12) \cdot 10^{-8}$ , ориентированных с севера на юг и являющихся продолжением аналогичных зон на прилегающих участках ВЕП. Для сопоставления поля деформаций и сейсмической активности были использованы данные о землетрясениях, предоставляемые Геологической службой США. За выбранный временной интервал в пределах рассматриваемой территории зафиксировано 436 сейсмических событий с магнитудами ( $M_s$ ) 1.0–5.7, из них 7 – с  $M_s > 5$ . Распределение сейсмичности неравномерно, большая активность была присуща восточной части региона. В среднем величина выделившейся энергии составляет  $10^7$ – $10^9$  Дж/км<sup>2</sup>, в отдельных местах достигая  $10^{15}$  Дж км<sup>2</sup>. Северокавказский регион продолжает развиваться в условиях сближения Евразийской и Аравийской литосферных плит, что в рассматриваемый временной интервал отражается в региональном поперечном сжатии и продольном растяжении. Кроме того, встречаются участки аномального сжатия и растяжения, вызванные, возможно, внутренними локальными факторами.

---

## ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В СЕЙСМИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ: СПУСКОВОЙ КРЮЧОК ИЛИ НОВОЕ СОДЕРЖАНИЕ

<sup>1</sup>*Гуфельд И.Л.*, <sup>2</sup>*Новоселов О.Н.*

*igufeld@korolev-net.ru*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской Академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Триггерные эффекты широко обсуждаются в геофизических науках и в работах по изучению сейсмического процесса. Однако в этих обсуждениях остается значительная неопределенность. Не обсуждается, как правило, определение самого триггерного акта, как спускового крючка, в рамках моделей подготовки корового и глубокого сейсмических явлений. В геофизике можно рассматривать множество триггерных актов, связь которых с сейсмическим явлением

пытаются доказать статистически или просто совпадением. Удивительно, но самые различные триггерные акты связывают с инициированием сильных сейсмических событий или активизацией слабых событий независимо от глубины гипоцентров. Процессы взаимодействия действующих триггерных полей со средой не рассматриваются. Не обсуждается также состояние геологической среды, находящейся в предельном по энергонасыщенности состоянии. Не учитывается непрерывная изменчивость параметров среды. Среда всегда находится в неустойчивом состоянии. Наблюдения показывают, что среда реагирует на различные слабые внешние воздействия. Особенно это было заметно при анализе длительного сейсмического режима в окрестностях подземных ядерных взрывов. При импульсных воздействиях источниками магнитных полей (магнитные бури, МГД генератор) явно выраженного влияния не было, т.е. как спускового крючка. Аналогичная ситуация была с сильными землетрясениями, возникающими в период вариаций атмосферного давления. Заметим, что небольшие изменения атмосферного давления фиксировали при солнечной активности. На среду непрерывно действуют микросейсмы и лунные приливы, инициирующее действие которых на землетрясения выделены статистически. Реальность такова, что на среду одновременно и непрерывно действуют различные природные силы, решающее действие одного из которых выделить трудно. Это означает, что для понимания триггерности процесса необходима разработка, прежде всего, моделей сейсмического процесса для коровых и глубоких событий и методов его мониторинга.

---

**СТАТИСТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ  
МАГИСТРАЛЬНОЙ ТРЕЩИНЫ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ:  
АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ И РЕНТГЕНОВСКАЯ ТОМОГРАФИЯ**  
*Дамаскинская Е.Е., Гиляров В.Л., Пантелейев И.А., Корост Д.В., Фролов Д.И.  
damaskinskaya@yahoo.com*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

Проведено исследование особенностей формирования магистральной трещины в образцах гранита Westerly при квазистатическом одноосном сжатии без бокового подпора по данным акустической эмиссии (АЕ) и рентгеновской компьютерной микротомографии (СТ). Всего было испытано две серии образцов (по 7 в каждой). Первая серия – специально изготовленные цилиндрические образцы с не плоскопараллельными торцами (непараллельность составляет  $\approx 0.5^\circ$ ), вторая серия – стандартные цилиндрические образцы с плоскопараллельными торцами. Отсутствие параллельности торцов позволяет получить при одноосном квазистатическом сжатии явно выраженную сдвиговую компоненту, что сказывается на процессе формирования магистральной трещины. При испытании образцов второй серии снятие нагрузки проводилось незадолго до макроразрушения образца, после чего процесс регистрации акустической эмиссии продолжался. Такой алгоритм нагружения позволил исследовать процесс релаксации напряжений в материале с развитой дефектной подсистемой (с фактически полностью сформированной магистральной трещиной). Во всех экспериментах был проведен один этап сжатия с постоянной скоростью перемещения пуансонов 10  $\mu\text{m}/\text{min}$ . Для исследования стадийности процесса формирования магистральной трещины были использованы два подхода к анализу данных акустической эмиссии, зарегистрированной в течение всего времени деформирования: мультифрактальный анализ пауз между последовательными во времени сигналами АЕ и анализ

функционального вида распределения сигналов АЕ по энергии. Мультифрактальный анализ был применен для изучения временных рядов пауз между сигналами АЕ. Ряды пауз разделялись на частично перекрывающиеся последовательности из 1024 элементов, для каждой из которых рассчитывался спектр сингулярностей. Строились зависимости от времени двух основных его параметров – коэффициента Херста и ширины спектра. Отмечено увеличение коэффициента Херста и уменьшение ширины спектра сингулярностей приближении к моменту разрушения образцов. Исходя из этого сделан вывод о фрактальной самоорганизации перед разрушением – изменением характера процесса от более сложного мультифрактального к более простому – монофрактальному. Проведен детальный анализ функционального вида распределений сигналов АЕ по энергии. Во всех экспериментах с помощью метода последовательных приближений удалось определить момент времени, после которого энергетическое распределение становится степенным. (До этого времени энергетическое распределение описывается экспоненциальной функцией). В экспериментах образцы сохранили целостность, что позволило провести томографическую съемку. На основе анализа томографических срезов были построены трехмерные картины дефектной структуры. В образцах с не плоскопараллельными торцами образовалась одна плоская трещина (фрактальная размерность  $\approx 2.2$ ) параллельная оси образца, расположенная ближе к его краю, что указывает на преимущественно сдвиговой характер ее формирования. Трехмерная область локализации микротрещин (магистральная трещина) в образцах второй серии имеет более сложную форму (фрактальная размерность  $\approx 2.6$ ) и наклонена относительно оси деформирования на некоторый угол, который является типичным для одноосно деформируемых образцов с трением на торцах. Важно отметить, что в обеих сериях экспериментов все дефекты образовались только в области магистральной трещины, в других частях образца дефектов не обнаружено. Следовательно, в этих экспериментах не наблюдалось дисперсного накопления дефектов вне области трещины. В данных экспериментах, несмотря на локализованный (в пространстве) характер накопления дефектов, выявленный методом рентгеновской микротомографии, анализ энергетических распределений сигналов АЕ позволил выделить принципиально различные стадии развития магистральной трещины. Это свидетельствует об универсальности используемого подхода и найденных закономерностей. Данный результат позволяет говорить о том, что формирование магистральной трещины является многостадийным процессом, с присущей таким явлениям сменой стадии равновесной устойчивой эволюции на стадию неустойчивого развития.

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

---

## РОЛЬ ИОНОСФЕРЫ В СТИМУЛИРОВАННЫХ ВЫСЫПАНИЯХ АВРОРАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

**Деминов М.Г.**

deminov@izmiran.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, Москва, Троицк, Россия

Представлены результаты анализа роли ионосферы в стимулированных высываниях авроральных электронов, т.е. электронов с энергиями  $\sim 1\text{--}10$  кэВ. В

периоды интенсивных бурь или суббурь в магнитосфере такие высыпания могут быть связаны с процессами в экваториальной плоскости магнитосферы. Не менее важная известная причина стимулированных высыпаний авроральных электронов связана с цепочкой процессов на относительно низких высотах ( $\sim 0.5\text{--}1.0$  RE) вдоль геомагнитного поля над авроральной областью, т.е. вне плазмосферы. На этих высотах могут выполняться условия, когда дрейфовая скорость электронов, связанная с продольным током в системе ионосфера-магнитосфера, превышает пороговое значение для развития плазменных неустойчивостей и, в первую очередь, электростатической ионно-циклотронной (ЭИЦ) неустойчивости. Рост амплитуды ЭИЦ-волн может привести к ЕИЦ-турбулентности, образованию аномального сопротивления и продольного электрического поля. Ускоренные вниз в этом поле сверхтепловые электроны обеспечивают стимулированное высыпание электронов. Типичные средние условия в ночной авроральной ионосфере таковы, что параметры продольного тока близки к пороговым условиям для развития плазменных неустойчивостей на высотах 0.5–1.0 RE. Поэтому достаточно слабого возмущения продольного тока для возникновения стимулированного высыпания электронов. Такими дополнительными возмущениями могут быть продольные токи альвенновской волны, которые генерируются на высотах динамо-области ионосферы, в том числе, при искусственном воздействии на ионосферу. Эффективности перечисленных процессов существенно зависят от фоновых параметров ионосферы, включая проводимость динамо-области ионосферы и высотное распределение концентрации электронов, ионного состава, температуры электронов и ионов. Эти параметры зависят от гелиогеофизических условий, поэтому эффективность стимулированного высыпания электронов также зависит от гелиогеофизических условий. Представлены наиболее важные из этих зависимостей. Показано, в частности, что возникновение самоподдерживающегося режима стимулированного высыпания авроральных электронов оптимально для зимней авроральной области в предполуночные и околоволночные часы. Данный механизм стимулированного высыпания авроральных электронов приводит к асимметрии зима/лето в потоках ускоренных электронов и в концентрации электронов на высотах динамо-области ионосферы, подтверждая важную роль ионосферы в высыпаниях ускоренных электронов.

---

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИОНОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ, ЗАМЫКАЮЩЕГО ГЛОБАЛЬНУЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ЦЕПЬ

*<sup>1,2</sup>Денисенко В.В., <sup>3,4</sup>Райкрофт М.Д., <sup>5,6</sup>Харрисон Р.Д.*

*denisen@icm.krasn.ru*

<sup>1</sup>Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

<sup>3</sup>Цезарь-консалтинг, Кембридж, Великобритания

<sup>4</sup>Центр космических, атмосферных и океанических наук, факультет электроники и электротехники, Университет Бата, Бат, Великобритания

<sup>5</sup>Факультет метеорологии, Университет Рединга, Рединг, Великобритания

<sup>6</sup>Факультет электроники и электротехники, Университет Бата, Бат, Великобритания

Построена модель распределения ионосферного потенциала, который рождает токи, замыкающие глобальную электрическую цепь. Рассматриваются только внутренние электрические поля и токи, генерируемые грозами. Высотные профили атмосферной проводимости определяются эмпирически, учитывается топография поверхности Земли. Используется двумерное приближение при

описании ионосферного проводника, которое основано на высокой проводимости вдоль геомагнитного поля. Пространственные распределения проводимостей Педдерсена и Холла рассчитываются с использованием эмпирических моделей IRI, MSIS и IGRF. Показано, что долготные и широтные составляющие ионосферного электрического поля глобальной электрической цепи, в типичных для июля условиях при высокой солнечной активности в рассматриваемый момент времени 19:00 UT, не превышают 9 мкВ/м, а в освещенной солнцем ионосфере они составляют менее 2 мкВ/м. Полученная в расчетах максимальная разность потенциалов в E- и F-слоях составляет 42 В; максимум потенциала формируется над африканскими грозами, которые в это время находятся вблизи терминаатора. Минимального значения потенциал достигает около полуночи над Гималаями. В нашей модели потенциал имеет одинаковые значения в сопряженных точках ионосферы. Напряжение внутри ионосферы увеличивается до 55 В в 23:00 UT и достигает 72 В в 06:00 UT, когда наступает местная полночь, соответственно, для районов гроз в Африке и Центральной Америке. Эти напряжения становятся примерно вдвое большими при минимальной солнечной активности. В нашей более реалистичной ионосферной модели электрические поля получаются на порядок меньшими, чем в хорошо известной модели Робла и Хайса (1979). Первые результаты нашего моделирования представлены в следующей статье с опубликованным исправлением вкравшихся в ее текст опечаток [1–3].

#### Литература

1. *Denisenko V.V., Rycroft M.J., Harrison R.G.* (2019) Mathematical Simulation of the Ionospheric Electric Field as a Part of the Global Electric Circuit // Surveys in Geophysics, 40(1), 1–35. DOI: 10.1007/s10712-018-9499-6.
2. *Denisenko V.V., Rycroft M.J., Harrison R.G.* (2019) Correction to: Mathematical Simulation of the Ionospheric Electric Field as a Part of the Global Electric Circuit // Surveys in Geophysics, 40(1), 37. DOI: 10.1007/s10712-018-9505-z.
3. *Roble R.G., Hays P.B.* (1979) A quasi-static model of global atmospheric electricity. 2. Electric coupling between the upper and lower atmosphere // J. Geophys. Res. 84(A12), 7247–7256. DOI: 10.1029/JA084iA12p07247.

---

## ВАРИАЦИИ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА СЛОЯ ГОДОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ТЕМПЕРАТУР ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ В РАЗЛИЧНЫХ МЕРЗЛОТНО-СЕЙСМИЧЕСКИХ РАЙОНАХ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

*Джурек В.И., Брыжак Е.В., Серебренников С.П., Ескин А.Ю.*

dzhurik@crust.irk.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Рассматривается связь параметров температурных и геофизических полей, связанных с годовыми вариациями спектрального состава колебаний поверхности грунтов при землетрясениях. Результаты исследований представляются на примере многолетних данных по записям землетрясений, зарегистрированных в различных сейсмоклиматических зонах Байкальского региона. В рассмотрение включается влияние наиболее динамичной зоны обязанной экзогенным процессам, происходящим, в свою очередь, в области влияния годовых вариаций температур. Байкальский регион, расположенный в пределах Восточной Сибири, которая входит в умеренный и холодный климатический пояс и в области резко континентального климата с высокой сейсмической активностью. Среднегодовая температура может опускаться ниже  $-10^{\circ}$ . В этом отношении не

маловажную роль, для различных построений, играют данные о периодическом изменении спектрального состава колебаний при землетрясениях в различных сейсмоклиматических зонах региона. В качестве основных показателей рассматриваемых изменений выбраны спектры зарегистрированных землетрясений постоянной сетью сейсмических станций Байкальского региона и частотные характеристики колебаний верхней зоны разреза. Наиболее детально рассмотрены случаи для сейсмостанций, расположенных в районах с контрастными мерзлотными условиями. Далее, в обобщенном виде, они дополнены результатами аналогичных исследований для сейсмостанций, расположенных в различных мерзлотных условиях региона. По амплитудному уровню спектры могут различаться на 2–4 порядка, что отвечает интервалу изменения магнитуд, эпицентральных расстояний и другим параметрам очагов отобранных землетрясений. Можно отметить и диапазон частот спектров на уровне 0.7 от их максимума, который играет существенную роль при оценке энергетического уровня землетрясений. В нашем случае он может меняться от 2 до 14 Гц. Анализ состава годовых вариаций колебаний по расчетным частотным характеристикам является более достоверным. В результате выявлено, что на всем рассматриваемом диапазоне частот (до 20 Гц), наиболее существенно они проявляются на относительно высоких частотах. На уровне среднеквадратичных отклонений, выделены диапазоны влияния сезонных изменений температур на амплитудно-частотный состав колебаний, для каждой сейсмической станции. Они, в основном, проявляются на частотах выше 4–6 Гц и зависят от грунтовых особенностей оснований, на которых установлены сейсмоприемники. Это относится к зонам как сплошного, так и островного распространения мерзлоты. Но по амплитудному составу различия значительны для зоны островного распространения мерзлоты, в особенности на частотах более 8–10 Гц. Например, на частотах 16–18 Гц в летний период максимум частотной характеристики может достигать 6–10, а в периоды максимального промерзания они близки к единице. Выполненные исследования при использовании более 200 трехкомпонентных записей землетрясений, зарегистрированных на постоянных сейсмических станциях БФ ГС СО РАН, подтверждают наличие общей закономерности, связанной с относительным уровнем увеличения или уменьшения интенсивности сейсмических колебаний приповерхностного слоя грунтовых отложений, которые коррелируются с периодическими годовыми колебаниями температур для различных мерзлотных условий Байкальского региона.

---

## АЛГОРИТМ С ЕДИНСТВЕННЫМ КЛАССОМ ОБУЧЕНИЯ В РАСПОЗНАВАНИИ СЕЙСМОПАСНЫХ ЗОН

<sup>1,3</sup>Дзебоев Б.А., <sup>1,2</sup>Гвишиани А.Д., <sup>1</sup>Королькова А.А.

b.dzeboev@gcras.ru

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>3</sup>Геофизический институт – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального научного центра «Владикавказский научный центр Российской академии наук», Владикавказ, Россия

Для распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений ( $M \geq M_0$ ) в классическом подходе EPA (Earthquake-Prone Areas recognition) используются алгоритмы дихотомии с обучением: «Кора-3», «Подклассы»,

«Хемминг» и др. Их стартовым этапом является формирование обучающих выборок высоко- и низкосейсмичного классов, на базе которых проводится обучение алгоритмов. При этом во всем множестве объектов распознавания формируются две выборки высоко- и низкосейсмичного классов для обучения алгоритма дихотомии. По сути самой задачи, являющейся предельной проблемой распознавания, низкосейсмичный класс обучения содержит в себе потенциальные ошибки. Таковыми являются объекты, которые перейдут в высокосейсмичный класс в результате решения задачи. В разработанном авторами алгоритме «Барьер» обучение осуществляется исключительно по высокосейсмичному классу. Задача алгоритма «Барьер» – отказываясь от обучения по низкосейсмичному классу, изучить характеристики обучающей выборки единственного данного высокосейсмичного класса и на базе полученных знаний выявить объекты «похожие» на объекты обучения. Последние объявляются алгоритмом «Барьер» высокосейсмичными. Говоря языком распознавания образов, «Барьер» решает задачу построения в конечном множестве объектов распознавания подмножества, расширяющего единственный высокосейсмичный класс обучения. «Барьер», обучаясь только по одному высокосейсмичному классу, не является алгоритмом дихотомии. Однако он может эффективно использоваться как часть подхода ЕРА вместо вышеуказанных алгоритмов дихотомии. Таким образом, создание авторами алгоритма «Барьер» можно рассматривать как новый шаг в решении проблемы распознавания мест возможного возникновения сильнейших, сильных и значительных землетрясений. Алгоритм «Барьер» оказался эффективным при распознавании мест возможного возникновения землетрясений с одним классом обучения на Кавказе ( $M \geq 6.0$ ) и в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье ( $M \geq 6.0$ ). Предполагается его тестирование в других горных странах, где уже применялся классический подход ЕРА. Результаты распознавания алгоритмом «Барьер» в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье использованы для оценки влияния Алтае-Саянской орогенной области на устойчивость структурно-тектонических блоков земной коры и сейсмическую опасность в зоне контакта Западно-Сибирской платформы и Сибирской плиты. Это вносит вклад в изучение проблемы геоэкологической безопасности захоронения высокоактивных радиоактивных отходов в пределах Нижне-Канского массива.

*Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда (№ 18-17-00241) «Исследование устойчивости породных массивов на основе системного анализа геодинамических процессов для геоэкологически безопасной подземной изоляции радиоактивных отходов».*

---

## СЕЙСМИЧНОСТЬ ВОСТОЧНО-БЕЙСКОГО РАЗРЕЗА (ХАКАСИЯ): ДИСКРИМИНАЦИЯ СЛАБЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ВЗРЫВОВ

<sup>1,2</sup>*Добрынина А.А.*, <sup>3</sup>*Герман В.И.*

*dobryunina@crust.irk.ru*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земной коры Сибирского отделения РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геологический институт Сибирского отделения РАН, Улан-Удэ, Россия

<sup>3</sup>Красноярский научно-исследовательский институт геологии и минерального сырья, Красноярск, Россия

В работе рассматривается задача разделения промышленных взрывов и слабых землетрясений на основе спектральной обработки записей сейсмических событий, локализованных вблизи Восточно-Бейского угольного разреза

(республика Хакасия). Разделение землетрясений и промышленных взрывов является одной из важных задач при изучении региональной сейсмичности, особенно актуальной для окрестностей месторождений, где разработка ведется с помощью взрывов. Как правило, в качестве критериев дискrimинации используются отношения амплитуд сейсмических волн ( $P/S$ ,  $Pg/Lg$ ), форма записи, знаки первых вступлений, наличие поверхностной волны, спектральные характеристики сейсмограммы и др. В районах с высоким уровнем сейсмичности и большим количеством взрывов также используется «статистический» подход: все слабые землетрясения, локализованные в районе, где ведутся взрывные работы, произошедшие в дневное время, автоматически причисляются к взрывам. Применимость всех перечисленных критериев сильно зависит от геологических условий, глубины взрыва и др. В настоящей работе сделана попытка определить наиболее действенные критерии дискrimинации землетрясений и промышленных взрывов локального района вблизи Восточно-Байского угольного разреза. Нами анализировались 22 промышленных взрыва (с магнитудами  $M = 1.2\text{--}2.3$ ) и 6 землетрясений (Абаканское землетрясение, 12 декабря 2013 г.,  $M = 4.9$  и его афтершоки с  $M = 0.8\text{--}2.2$ ). Сейсмограммы изучались с помощью комплекса методов: визуальный анализ (форма записи, наличие поверхностной волны, полярность  $P$ -волн, отношения амплитуд  $P/S$  и  $Pg/Lg$ -волн), фильтрация записей системой узкополосных фильтров, анализ спектров Фурье и спектрально-временной анализ (СВАН). Анализ сейсмограмм взрывов показал, что для разных взрывов отношения амплитуд  $P/S$  и  $Pg/Lg$  волн сильно меняются, на некоторых записях выделяются поперечные волны. Длительность и амплитуды поверхностных волн также различны для разных взрывов. Сравнение спектров землетрясений и взрывов показало, что для взрывов характерны более сложные изрезанные спектры с максимумами в области низких частот. Более информативными оказались СВАН-диаграммы, показывающие распределение интенсивности сейсмического излучения по частотам и по времени. Для исследуемых землетрясений максимум излучения приходится на поперечные волны (диапазон от 4 до 25 Гц), при этом низкочастотная составляющая излучения быстро затухает со временем. Второй максимум излучения (более слабый, с частотами  $> 10$  Гц) соответствует  $P$ -волнам. Для взрывов наблюдается противоположная картина – максимум излучения приходится на продольные волны в широком диапазоне частот – от 4 до 25 Гц, интенсивность излучения поперечных волн значительно ниже, очень хорошо видны поверхностные волны. Для взрывов характерно более быстрое затухание высокочастотной составляющей излучения по сравнению с землетрясениями. В результате применения и анализа разнообразных критериев дискrimинации землетрясений и промышленных взрывов для района Восточно-Байского угольного разреза установлено, что наиболее информативным является использование спектрально-временного анализа сейсмограмм.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области (проект № 17-45-388049).*

**ПАРАМЕТРЫ ОЧАГА КАТАВ-ИВАНОВСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ  
4 СЕНТЯБРЯ 2018 г. ПО ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫМ  
И МАКРОСЕЙСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ**

**Дягилев Р.А., Габсатарова И.П., Епифанский А.Г.**

[dra@gsras.ru](mailto:dra@gsras.ru)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Обнинск, Россия

Катав-Ивановское землетрясение, произошедшее 4 сентября 2018 г. в 22:58:19 (по Гривичу) на Южном Урале, зарегистрировано сотнями станций по всему миру и по факту стало самым сильным инструментально зафиксированным землетрясением на Урале ( $mb$  5.4) и самым ощущимся на территории России в 2018 году ( $I_0 = 6$  баллов). Координаты эпицентра ( $54.793^\circ$  с.ш.,  $58.002^\circ$  в.д.), рассчитанные по данным сети телесейсмических станций и региональной сети (всего 57 станций), указывают на положение очага в районе северной окраины п. Караволовка. Ошибка определения эпицентра составляет 8.4 км. Конфигурация региональной сейсмической сети не позволяет определить глубину достаточно точно, поскольку ближайшие сейсмические станции расположены на расстоянии 150–180 км. Минимальная невязка между измеренными и теоретическими временами вступлений получена при глубине очага 9.5 км, стандартное отклонение величины – 7.2 км. В то же время применение способа уточнения глубин очагов с использованием функции согласования фазовых спектров первых вступлений, рассчитанной по данным 36 станций [1], дает соизмеримые оценки глубины –  $11.25 \pm 0.29$  км. Очаг землетрясения, находясь в нескольких километрах от г. Катав-Ивановска Челябинской области, вызвал в городе самые сильные сотрясения (6 баллов). Зона 5-балльных сотрясений охватила Усть-Катав, Юрзянъ, Сим. 4-балльные сотрясения достигли Аши, Миасса, Бакала, Сатки. Зона 3-балльных колебаний распространилась до Уфы, Белорецка, Златоуста, Миасса. Собранные макросейсмические данные позволили определить макросейсмический эпицентр (в 8 км восточнее от очага по инструментальным данным) и получить альтернативную оценку глубины очага –  $20 \pm 10$  км. Механизм очага рассчитан по знакам первых вступлений на 57 станциях в диапазоне расстояний от  $1.35$  до  $89.63^\circ$  с достаточно равномерным азимутальным окружением (максимальная азимутальная брешь расположена с юга и не превышает  $80^\circ$ ). Согласно полученному решению в зоне очага действовали напряжения с осью сжатия, ориентированной на юг-юго-восток (азимут  $147^\circ$ ) и осью растяжения запад-юго-западного направления (азимут  $249^\circ$ ). Нодальная плоскость NP1 простирается на север-северо-восток (азимут  $19^\circ$ ), нодальная плоскость NP2 ориентирована на запад-северо-запад (азимут  $285^\circ$ ). В первом варианте смещение представляет собой левосторонний взбросо-сдвиг, во втором – правосторонний сдвиг с незначительной взбросовой компонентой. Механизм очага хорошо согласуется с тектонической обстановкой района. Направление напряжения в очаге практически совпадает с напряжениями, полученными альтернативными методами в районе [2], а разрыв по плоскости NP1 совпадает по простирианию и характеру подвижки с разрывами Бакало-Саткинской зоны разломов.

**Литература**

1. Епифанский А.Г., Габсатарова И.П., Муромцева Л.К., Карташенко Д.В., Бабкова Е.А. Применение метода «согласования спектральных фаз» для исследования глубины Алтайского (Чуйского) землетрясения 27.09.2003 г. // Результаты

комплексного изучения сильнейшего Алтайского (Чуйского) землетрясения 2003 г., его место в ряду важнейших сейсмических событий XXI века на территории России: материалы ХХI Научно-практической Щукинской конференции с международным участием (г. Москва, 1–4 октября 2018 г.) / Ред. Е.А. Рогожин, Л.И. Надежка. – М. : ИФЗ РАН, 2018. С. 142–147.

2. Тевелев Ал.В., Тевелев Арк.В., Хотылев А.О., Прудников И.А., Володина Е.А., Мосьеичук В.М. Землетрясения 2018 года в Катав-Ивановске (Южный Урал): кинематика инициирующих разрывов // Проблемы тектоники континентов и океанов. Материалы LI Тектонического совещания. – М.: ГЕОС, 2019. С. 286–290.

---

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗВИТИЯ ОЧАГА ТЕКТОНИЧЕСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА СОГЛАСОВАНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ФАЗ

**Енифанский А.Г.**

eriphansky@gmail.com

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба РАН», Москва, Россия

Приведены результаты применения разработанного метода согласования спектральных фаз к обработке цифровых сейсмограмм тектонических событий. Метод построен на основе корреляционного согласования спектральных фаз Фурье преобразования начального участка движения сейсмических фаз. При исследовании были использованы первое движения в P-волне и глубинных pP (и sP) волнах. Разработанный метод в первую очередь предназначался для исследования глубин коровых тектонических землетрясений. В основе метода лежит расчет значения функции согласования по данным набора сейсмических станций и набора заданных сейсмических фаз. Программная реализация позволяет использовать в расчетах выбранные сейсмические фазы одновременно для всего набора станций. Графические функции программы позволяют строить двумерные диаграммы для отображения значений функции согласования в зависимости от двух параметров – глубина и относительное время в очаге и производить измерения значения функции согласования в любой точке диаграммы. Это позволяет увидеть структуру очага землетрясения в заданных координатах (глубина – относительное время в очаге) и исследовать процессы, предваряющие первое видимое движение на сейсмограмме. Показано, что очаг сейсмического события сложный – состоящий из нескольких частей (объемов), в которых происходит ускоренное движение, перемежающихся зонами относительно спокойного движения (проскальзывания). Сейсмические приборы регистрируют «видимые» на сейсмограммах смещения, которые, как правило, соответствуют уже окончательному «совокупному» движению по разлому. Проведены исследования спектрального состава различных частей, составляющих очаг в целом. Проведены попытки определения энергетических характеристик наблюдаемых движений. Отмечается, что выделяются и более «простые» очаговые процессы. К ним относятся, например, отдельные глубокие землетрясения в Гиндукуше и взрывы ПЯВ в Северной Корее.

# СЕЙСМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС, СОПРОВОЖДАЮЩИЙ ФОРМИРОВАНИЕ ЧУЙСКО-КУРАЙСКОЙ РАЗЛОМНОЙ ЗОНЫ. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

**Еремин М.О.**

e-mail: eremin@ispms.tsc.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского Отделения Российской Академии Наук, Томск, Россия

Комплексная оценка сейсмической опасности в районах, подверженных землетрясениям, обычно основана на регистрируемой и исторической сейсмичности, но может быть улучшена с помощью моделирования динамики активных разломов и связанных землетрясений. В работе выполнено моделирование формирования Чуйско-Курайской разломной зоны при активизации глубинного разлома. На основе литературных данных о геофизических полях в Чуйско-Курайской области, пространственно-временных особенностях сейсмического процесса Чуйского землетрясения и афтершоков, сформировавшихся поверхностных структур в виде эшелонированных правосторонних сдвигов, а также применения ГИС-технологий была создана полноразмерная трехмерная модель Чуйско-Курайской области с учетом современного рельефа, а также иерархического строения [1–8]. На основе адаптированных математических моделей поведения нагруженных геологических сред [9–11] выполнено моделирование формирования разломной зоны и сейсмического процесса, сопровождающего ее формирование. Получены стадии формирования разломной зоны, пространственная и временная структура сейсмического процесса. Расчеты свидетельствуют о существенной неоднородности развития деформационного процесса, как в пространстве, так и во времени, а сейсмичность является заключительным катастрофическим этапом эволюции напряженно деформированного состояния нагруженной геосреды на различных масштабах.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-35-00224).*

## Литература

1. Liseikin A.V., Soloviev V.M. The epicentral area of the Chuya earthquake: A three-dimensional velocity structure (Gorny Altai), Russian Geology and Geophysics (2005), 46 (10), 1073–1082.
2. Rogozhin, E.A. et al. Tectonic setting and geological manifestations of the 2003 Altai earthquake, Geotectonics (2007) doi: 10.1134/S001685210702001X.
3. Lunina, O.V. et al. Seismotectonic deformations and stress fields in the fault zone of the 2003 Chuya earthquake, Ms = 7.5, Gorni Altai, Geotectonics. (2006), doi:10.1134/S0016852106030058.
4. Lunina, O.V. et al. Geometry of the fault zone of the 2003 Ms = 7.5 Chuya earthquake and associated stress fields, Gorni Altai, Tectonophysics. (2008), doi:10.1016/j.tecto.2007.10.010.
5. Novikov, I.S. et al. The system of neotectonic faults in southeastern Altai: orientations and geometry of motion, Rus. Geol. Geop. (2008) doi: 10.1016/j.rgg.2008.04.005.
6. Leskova, E.V. and Emanov, A.A. Some properties of the hierarchical model reproducing the stress state of the epicentral area of the 2003 Chuya earthquake, Izvestiya, Phys. Sol. Earth. (2014), doi: 10.1134/S1069351314030057.
7. Dobretsov, N.L., Buslov, M.M., Vasilevsky, A.N., Vetrov, E.V., Nevedrova, N.N. Cenozoic history of topography in southeastern Gorny Altai: thermochronology and resistivity and gravity records, Russian Geology and Geophysics. (2016), 57 (11), 1525–1534, doi:10.1016/j.rgg.2016.10.001.
8. Vetrov, E.V., Buslov, M.M., De Grave, J. Evolution of tectonic events and topography in southeastern Gorny Altai in the Late Mesozoic-Cenozoic (data from apatite fission track thermochronology), Russian Geology and Geophysics. (2016), 57 (1), 95–110, doi:10.1016/j.rgg.2016.01.007 1.
9. Stefanov, Y.P., Bakeev, R.A., Rebetsky, Y.L., Kontorovich, V.A. Structure and formation

- stages of a fault zone in a geomedium layer in strike-slip displacement of the basement, *Physical Mesomechanics*. (2014), 17, 204–215, doi:10.1134/S1029959914030059.
10. Drucker, D.C., Prager, W. Soil Mechanics and plastic analysis or limit design, *Q. Applied Math.*, 10, 157–165 (1952).
11. Kapustyanikii, S.M., Nikolaevskii, V.N., Zhilenkov, A.G.: Nonholonomic model of deformation of highly porous sandstone under its internal crushing, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 46, 1095–1104 (2010).

---

## ТРИГГЕРНЫЙ ЭФФЕКТ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКОГО УРОВНЯ ДЕФОРМАЦИЙ В ОЧАГОВЫХ ЗОНАХ

**Жантаев Ж.Ш., Виляев А.В.**

admion1@mail.ru

Институт ионосферы АО «Национальный центр космических исследований и технологий», Алматы, Казахстан

Рассматривается влияние изменения глубинных температур земной коры сейсмоактивного региона Северного Тянь-Шаня на формирование термоупругих деформаций в очаговых зонах землетрясений. Метод исследований основан на численном моделировании температур с привлечением данных о скорости продольных волн до глубины 100 км и экспериментальных зависимостей теплофизических параметров – теплового потока, коэффициента теплопроводности, радиогененной теплогенерации. Выполнен сравнительный анализ параметров геотермической модели с распределением землетрясений территории. Аномальные температуры определены вычитанием из расчетного поля стационарной составляющей, соответствующей линейному геотермическому градиенту 12 С/км. Определяющим фактором формирования критических деформаций является наличие высокотемпературных областей с избыточными температурами на 100–250°С выше солидуса на глубинах 20–45 км. Действующее давление рассчитано как сумма литостатического давления и термоупругих напряжений, вследствие неравномерного нагрева и неоднородности физико-механических свойств. Температурные напряжения составляют 12–27% от литостатического давления и достигают 0.45 ГПа. Коэффициент отношения полного давления (с учетом термобарического) к литостатическому в области аномальных температур равен 1.3–1.4. Расчеты находятся в интервале величин экспериментальных данных по минеральным равновесиям, показывающих, что тектоническое давление может достигать до 100% от литостатического и величин первых ГПа. Морфология изотермы избыточных температур 230°С в области аномального разогрева и изобарическая поверхность термоупругих напряжений интенсивностью 0.35 ГПа отнесены к критериям контролирующем распределение гипоцентров землетрясений среднего энергетического класса в объеме земной коры. Сделан вывод о преобладающем влиянии температурных условий на развитие сейсмического процесса в очаговых зонах.

---

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ СТРУКТУРНО ОДНОРОДНЫХ ОБЛАСТЕЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ (НА ПРИМЕРЕ КАСПИЙСКОГО РЕГИОНА)

**Жантаев Ж.Ш., Фремд А.Г., Исаков Б.А.**

e-mail: admion1@mail.ru

Институт Ионосферы НЦ КИТ, Алматы, Казахстан

В рамках решения задачи выделения структурно-однородных областей,

обладающих относительным внутренним однообразием, предлагается метод классификации по одному признаку, основанный на использовании различных геолого-геофизических параметров. Для районирования таких крупных объектов, как Каспийский регион использован набор равноправных данных, полученных в результате эксперимента. Допуская, что структурно-однородные области характеризуются стабильно близкими значениями параметров геофизических полей, а участки блоковых переходов (разломов) проявляются относительно быстрой сменой значений, вплоть до смены знака, можно предполагать, что градиент, как признак, можно использовать для проведения районирования и выявления относительно стабильных и структурно однородных участков земной коры в пределах изучаемого региона. Степень изменчивости, как основополагающий признак, наиболее устойчив в пространстве и во времени и поэтому может считаться более независимым и объективным. Для анализа степени изменчивости комплекса параметров были использованы известные алгоритмы, адаптированные к решению поставленной задачи – выявлению участков гомогенной среды. На основе использованных и созданных алгоритмов и программ разработан график обработки, предполагающий построение двумерного признакового пространства – карты распределения значений комплексного параметра «Слияние». Принимая градиент, как меру пространственной изменчивости отдельных геофизических полей можно для каждой точки рассматриваемой территории построить комплексную характеристику всей совокупности полученных распределений. Комплексный параметр нормирован от 0 до 1. И поэтому степень изменчивости можно оценивать в процентах от его максимального значения. Конечный результат представляется в виде матрицы значений, визуализированных в виде карты «Слияние» градиентов, дающих представление о распределении на местности структурнооднородных областей.

---

## **ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА СЕЙСМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА ПРИМЕРЕ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ**

**<sup>1</sup>Жантаев Ж.Ш., <sup>1</sup>Хачикян Г.Я., <sup>2</sup>Садыкова А.Б.**

e-mail: admion1@mail.ru

<sup>1</sup>Институт ионосферы АО «Национальный центр космических исследований и технологий», Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Институт сейсмологии МОН РК, Алматы, Казахстан

Приведены результаты исследования солнечно-литосферных связей на территории Северного Тянь-Шаня, полученные в последнее десятилетие учеными Казахстана. Показано, что сильнейшие землетрясения региона (с магнитудой более 7.0) произошли в периоды глобальных минимумов солнечной активности: Маундера (в районе Лепсинского разлома оз. Алаколь в 1715 г.); Дальтона (Алматинское землетрясение в 1807 г.); Гляйсберга (Верненское 1887 г., Чиликское 1889 г. и Кеминское 1911 г.), что находится в соответствии с установленным фактом отрицательной корреляции между уровнем солнечной активности и уровнем сейсмической активности Земли в целом. Показано, что на локальной территории Северного Тянь-Шаня, ограниченной координатами 42.65–43.3°N; 76.25–77.75°E, к которой, по данным глубинного сейсмического зондирования, сейсмической томографии и скоростному моделированию литосферы по геотраверсам, подходит снизу горячий мантийный поток, режим сейсмотектонической деформации изменяется в соответствии с 11-летними вариациями солнечной активности. В годы низкой солнечной активности на этой территории преобладает деформация сжатия (коэффициент Лоде-Надаи, рассчитанный по механизмам очагов землетрясений, имеет положительные

значения), что типично для всего Тянь-Шаня, а в годы высокой солнечной активности – преобладает деформация растяжения (коэффициент Лоде-Надаи имеет отрицательные значения). Представлен алгоритм расчета для территории Северного Тянь-Шаня максимально возможной магнитуды землетрясения (сейсмопотенциал) по максимально возможному здесь значению геомагнитной Z-компоненты в геоцентрической солнечно магнитосферной системе координат, в которой наилучшим образом отображается процесс проникновения энергии солнечного ветра в околосолнечное пространство. Алгоритм может быть полезен для оценки сейсмопотенциала тех регионов, которые слабо охвачены сейсмологическим мониторингом или находятся в настоящее время в режиме сейсмического затишья, что актуально для обеспечения сейсмобезопасности особо опасных стратегических объектов (например, атомной отрасли), размещение которых обычно проводится на территориях сейсмически спокойных в настоящее время, но возможно сейсмически активных в будущем. Рассматриваются гипотетические механизмы, возможно ответственные за отклик литосферы на вариации солнечной активности. В докладе использованы материалы: [Жантаев и др., 2013; Садыкова, 2012; Хачикян и др., 2015, Полешко и др., 2009].

---

## О ПРИНЦИПАХ ЗАОТКОСНЫХ РАБОТ ПРИ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

**Жариков С.Н., Кутуев В.А.**

333vista@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

В настоящее время среди горняков бытует вопрос: «Нужно или не нужно регламентировать проведение БВР при постановке уступов в предельное положение?». Для обоих сторон найдутся достаточно серьёзные аргументы, однако не будем в рамках данной статьи вдаваться в излишние подробности. Вместо этого целесообразно сосредоточить внимание на том, что фактически происходит на горных предприятиях. В бизнесе всё решается молниеносно. Если глава одного горно-промышленного объединения увидел у другого участника рынка конкурентное преимущество в виде снижения затрат за счёт уменьшения объема разноски, то у себя он пожелает и сделает то же самое, особо не обращая внимание на горно-геологические и технические условия разработки. Результатом быстрого изменения параметров разработки без организационного и культурного изменения работы в производственных цехах станут катастрофические оползневые явления, возникающие внезапно и, как правило, неожиданно даже для маркшейдерской службы. Экономическая выгода в данном случае начинает весьма существенно зависеть от того: упадёт борт или нет. Кто-то посчитает, что упадёт, а кто-то – что не упадёт, но, когда речь идет о безопасности и жизнях горняков, то всегда необходимо учитывать неблагоприятный исход. Инженер не должен надеяться на то, что не упадёт, а должен сделать так, чтобы гибель людей, когда борт упадёт, была невозможной. С этой точки зрения регламентирование заоткосных работ представляется как верный путь повышения безопасности горных работ. В мировой практике на этот счёт следует отметить австралийский сборник под редакцией Д. Рида и П. Стейси. Подробную рецензию на этот труд написал Зотеев В.Г. – крупный специалист в области устойчивости бортов карьеров. В целом рецензия положительная. Австралийский труд представляет собой пособие для повышения уровня квалификации инженерных работников и позволяет иметь

связную картину подготовки и принятия решений задач геомеханики при разработке глубоких карьеров. Указанный труд безусловно необходимо учитывать при проектировании бортов отечественных карьеров даже по той причине, что собственной аналогичной литературы для профессионалов в Российской печати пока нет. Однако крупные подвижки в решении проблемы такие, как разработка федеральных норм и правил по обеспечению устойчивости бортов карьеров и разрезов заполнит это свободное место. При этом, следует обратить внимание на то, что проведение геомеханических наблюдений и прогнозных расчётов в соответствии с современными прогрессивными методами измерений и их анализ, (что часто быстрореализуемо на многих предприятиях) в большинстве случаев не выявят развитие геодинамических движений вследствие воздействия на горный массив короткопериодных импульсных нагрузок, вызванных взрывными работами, пока заколообразование не станет явным. В этой связи само решение геомеханических задач при проектировании бортов должно быть тесно связано с буровзрывными работами, не только при формировании контура откоса, но и при подходе технологических взрывов к этому контуру. Учитывая, что в указанных областях знаний разные методические приёмы, а деформационные процессы рассматриваются в различных периодах, то организационное совмещение геомехаников и взрывников в рамках регламентирования заоткосных работ достаточно сложная задача, которая в принципе не может быть решена в результате их параллельной работы. Такие работы могут быть организованы лишь последовательно. В начале производится геомеханическая оценка состояния массива с определением устойчивых углов, после этого – исследование динамики взрывов, а затем разработка и внедрение специальной технологии буровзрывных работ на предельном контуре карьера.

---

## **ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ СТРУКТУРЫ АФТЕРШОКОВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ**

**Завьялов А.Д., Зотов О.Д., Кайн Б.И.**

**zavyalov@ifz.ru**

**ФГБУН Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия**

Афтершоки представляют собой яркий пример результата триггерного воздействия на литосферу. При этом в качестве явного триггера выступает главный толчок, запускающий процесс разрядки накопленных тектонических напряжений в локальной области очага, а афтершоки являются элементарными актами этого процесса. Мы исходим из концепции нестационарности горных пород в очаговой области, являющейся ее важнейшим свойством. Представляемый доклад посвящен результатам изучения особенностей реакции нелинейной динамической системы – очаговой зоны – на триггерное воздействие – главный толчок, и подбору эмпирических формул, описывающих пространственно-временную эволюцию афтершоков. Использованы данные мирового каталога землетрясений USGS/NEIC с 1973 по 2014 годы (<https://www.usgs.gov>) и региональных каталогов землетрясений Северной Калифорнии с 1968 по 2007 годы (<http://www.ncedc.org>) и Южной Калифорнии с 1983 по 2008 годы (<https://www.scec.org>). В работе проведен анализ обобщенных (кумулятивных) пространственных распределений афтершоковых последовательностей, полученных при изучении большого числа главных толчков, в зависимости от магнитуды главного удара. Полученные пространственные распределения по своей форме напоминают закон Омори. Предложены эмпирические формулы, описывающие эти зависимости. Рассмотрены примеры эволюции

афтершоковых последовательностей не только в пространстве, но и во времени. Показано, что после главного удара в очаговой зоне возникает «волна» активизации, которая распространяется от эпицентра главного удара к периферии очаговой зоны. Выполнена оценка скорости распространения такой активизации. В среднем она равна примерно 5–10 км/час. Показано, что в процессе релаксации накопленных напряжений в очаговой зоне, ее «деактивации», в пространственно-временной эволюции афтершоков наблюдается подобие волновой структуры. Мы полагаем, что одним из возможных подходов для описания такой структуры может быть введение в дифференциальное уравнение эволюции афтершоков диффузионного члена  $D\nabla^2 n$ , где  $D$  – параметр, имеющий физический смысл коэффициента диффузии. В этом случае возникает ассоциация с известным в математике уравнением Фишера-Колмогорова-Петровского-Пискунова. В контексте пространственно-временного распределения афтершоков, в котором возникают волновые структуры, обнаруженные нами эмпирически, оно интересно тем, что имеет автомодельные решения в виде распространяющихся нелинейных волн. В двумерной модели уравнения ФКПП естественным образом получает объяснение иногда наблюдаемая переменная скорость распространения «волны» активизации очаговой зоны. Таким образом, можно заключить, что релаксирующий, «остывающий» очаг – неисчерпаемый источник богатейшей физики.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проекта РФФИ (проект № 18-05-00096), а также программ государственных заданий Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.*

---

## О ВЗАЙМОДЕЙСТВИИ ПРОЦЕССОВ ВЗРЫВНОГО РАЗРУШЕНИЯ И ГЕОМЕХАНИКИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

**Закалинский В.М., Викторов С.Д., Шиповский И.Е., Мингазов Р.Я.**

*vmzakal@mail.ru*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия

Целью работы является развитие на основе теории и практики управления действием взрыва в различных горнотехнических условиях идеи концепции, заключающейся в разработке теоретических предпосылок и геомеханического обеспечения новых методов взрывного разрушения горных пород на больших глубинах при разработке месторождений полезных ископаемых. Кроме того, нашей задачей было определение при этом способов эффективного и безопасного решения конкретных технологических задач производства. Рассмотрен один из аспектов нового концептуального подхода для решения задач горного производства, связанных со сложными условиями разработки месторождений полезных ископаемых, в частности, проявлениями сейсмовзрывного эффекта и газо-удародинамических явлений, вызываемых техногенным воздействием. В основу подхода положено изучение взаимодействия исследований на стыке специальностей «Геомеханика» и «Разрушение горных пород», что позволяет использовать аналоги теоретического и экспериментального характера и соответствующий инструментарий одной из них в методологии эффективного применения приёмов и методов другой. Научная новизна заключается в разработке математических моделей процессов деформирования и разрушения геоматериалов на различном масштабном уровне при воздействии статических и динамических нагрузок, воспроизводящих

натурные условия. Проводится компьютерное моделирование на основе численных методов решения динамических задач механики деформированного твердого тела. В результате моделирования показано, что взрывное воздействие зарядов рассмотренных конструкций по-разному влияет на напряженно-деформированное состояние окружающего горного массива, что позволяет проводить подбор технологических параметров заряда путем проведения модельных расчетов на предмет снижения негативного воздействия на геосреду взрывных работ.

---

## СИСТЕМАТИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МЕТОДОМ LURR (LOAD-UNLOAD RESPONSE RATIO) НА САХАЛИНЕ

Закупин А.С.

dikii79@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, Южно-Сахалинск, Россия

Подход для среднесрочной оценки сейсмической опасности LURR (load/unload response ratio) [2], который ранее в российской практике не использовался, на Сахалине апробируется с 2014 года. За последние четыре года были получены результаты, которые в 2018 г. удалось систематизировать, и тем самым, получить данные об эффективности методики, причем как в ретроспективном, так и в оперативном формате [1]. Методика позволяет идентифицировать опасность реализации сильного сейсмического события в локальной области (до 300 км) за несколько лет до землетрясения с магнитудой не ниже 5. Ретроспективный анализ был выполнен для сильных землетрясений, которые произошли с 1988 по 2015 гг. Таких землетрясений на Сахалине было проанализировано пять (Невельское, Горнозаводское, Уангское, Пильтунское и Нефтегорское), из которых два первых были на юге, а остальные на севере. В ИМГиГ ДВО РАН для работы с LURR в 2015 г. был разработан специализированный программный комплекс Seis-ASZ. Анализ сейсмичности Сахалина проводился по данным нескольких сейсмических каталогов (основанных в целом на данных СФ ФИЦ ЕГС РАН) для анализа землетрясений с 1906 по 2015 гг. Использование различных каталогов для ретроспективного анализа оправдано тем, что удается охватить максимальное количество сильных землетрясений на Сахалине. Ретроспективные оценки дали хорошее согласование по времени (в пределах до двух лет) и месту для всех сильных землетрясений Сахалина за рассматриваемый промежуток времени. Также на Сахалине с 2015 года методом LURR было получено три признака в оперативном режиме. Для анализа в реальном времени с 2015 г. используется оперативный каталог. По двум признакам прогнозы закрыты, по третьему признаку по состоянию на февраль 2019 года имеется статус «в ожидании». Первые два признака позволили сформировать прогнозы Онорского 14.08.2016 ( $Mw = 5.8$ ) и Крильонского 23.04.2017 ( $Mw = 5.0$ ) землетрясений, которые были приняты на заседаниях Сахалинского филиала Российского экспертного совета по чрезвычайным ситуациям (протоколы № 3 от 11.05.2016 г., № 2 от 16.03.2017 г.). Анализ сейсмических данных 2015–2017 гг. в южной части Сахалина показал аномалию LURR которая отражена в достаточно локализованной зоне. Зона локализована в районе Тымь-Поронайского и Апреловского разломов. Потенциал в данной сейсмогенерирующей зоне оценивается до  $Mw = 6$ . Для реализации краткосрочного сейсмического прогноза и локализации очага возможного землетрясения в июне 2018 года начато развертывание систем геофизического мониторинга на полигоне

«Петропавловское», расположенном в опасной зоне. Полигон укомплектован дополнительными средствами сейсмического наблюдения (включая инновационные сейсмические датчики и гидрофоны молекулярно-электронного типа), радоновой станцией.

#### Литература

1. *Zakupin A.S., Levin Yu.N., Boginskaya N.V., Zherdeva O.A. Development of medium-term prediction methods: A case study of the August 14, 2016 Onor (Mw = 5.8) earthquake on Sakhalin // Russian Geology and Geophysics. 2018. Vol. 59, № 11. P. 1526–1532.*
2. *Yin X.C., Xuezhong C., Ziping S., and Can Y. A new approach to Earthquake Prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) Theory, Pure Appl. Geophys., 145 No. 3/4. 1995. P. 701–715.*

---

## ГЕНЕРАЦИЯ МЕТАНА ПРИ РАЗРУШЕНИИ УГЛЯ

**Захаров В.Н., Малинникова О.Н.**

e-mail: olga\_malinnikova@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия

Явление повышенного газовыделения при внезапных выбросах угля и газа известно давно, но единого мнения о причинах этого явления нет до сих пор. Резкое изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) газонасыщенного угля при подвигании забоя запускает цепочку процессов, которые могут приводить к лавинообразному разрушению угля в виде внезапного выброса угля и газа, при выполнении ряда условий. Необходим достаточный запас энергии (суммы энергии упругого сжатия угля и энергии расширяющегося метана), которая может реализоваться в процессе выброса, не менее  $0,2\div0,3$  МДж/м<sup>3</sup>. Скорость изменения (сброса) напряжения должна быть не ниже 1÷3 МПа/с, то есть выше скорости релаксации нового НДС массива. При этом массив оказывается перенасыщен энергией упругого сжатия угля из-за скачкообразного падения его прочности и энергией расширяющегося свободного газа, количества которого резко возрастает за счет увеличения объема метана, десорбирующегося в расширяющиеся трещины и макропоры. Характер разрушения при этом определяющим образом зависит от величины и скорости снятия бокового напряжения со стороны забоя. Проведенные оценки потребляемой и затрачиваемой в этих процессах энергии дают основание полагать, что расширяющийся метан может не только механически разрушать уголь отрывом и выносить его в выработку. Химически связанный метан, освобождаясь, может изменять структуру угля, разрывая слабые связи в его алифатической части, «бахроме» вещества угля. При этом разрушение угля происходит на внутримолекулярном уровне, образовавшиеся фрагменты «бахромы» являются свободными радикалами. Экспериментальные исследования показали, что молекулы вещества угля теряют значительную часть алифатических CH<sub>3</sub>- групп, оторванные радикалы (CH<sub>3</sub>- группы) химически активны и могут, совместно, с не менее активным атомарным водородом, также оторванным от «бахромы» молекулы угля, образовывать метан. То есть, при внезапном выбросе в результате механохимических процессов происходит что-то вроде ускоренного метаморфизма угля с образованием метана. Это подтверждается еще и тем, что технический анализ угля из выброса показал, что мелкие фракции угля содержат меньше летучих веществ в своем составе, то есть более мелкая фракция, представляющая собой более разрушенный уголь, оказывается более метаморфизована. 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.

---

## ВЗАИМНОЕ ВЛИЯНИЕ ТРЁХМЕРНЫХ ТРЕЩИН В УПРУГОМ ТЕЛЕ

**Звягин А.В., Лужин А.А., Шамина А.А.**

[zvsasha@rambler.ru](mailto:zvsasha@rambler.ru)

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Одной из актуальных проблем современной механики разрушения является задача исследования концентрации напряжений в окрестности трещин в трёхмерном пространстве. В настоящее время существуют хорошо развитые эффективные методы решения двумерных задач о трещинах. Одним из таких методов является метод разрывных смещений [1]. Преимуществом данного метода является возможность точного выполнения уравнений теории упругости. При этом граничные условия выполняются на дискретном множестве точек границы, которое можно сделать сколь угодно плотным. Для численного решения трёхмерных задач механики твёрдого деформируемого тела чаще всего используются методы конечных элементов. Но их использование для трещин в трёхмерном пространстве сталкивается с большими трудностями, поскольку построение полей напряжений и перемещений в окрестности трещин требует построения достаточно мелкой, адаптированной к геометрии трещин, сетки из конечных элементов. При наличии системы трещин сложной геометрии задача становится фактически невыполнимой. В данной работе предлагается численный метод граничных элементов, реализующий метод разрывных смещений в трёхмерном пространстве. Преимуществом данного метода является то, что на конечные элементы разбивается только поверхность трещин, моделирующая разрыв упругой среды. Это понижает размерности задачи на стадии её решения. С точки зрения математической теории, данный подход является одной из реализаций метода разложения решения по «не ортогональным» функциям [2]. После численного определения коэффициентов разложения мы имеем фактически аналитическое представление решения в виде конечного ряда внутри области. С точки зрения памяти, нам надо хранить только найденные коэффициенты разложения, позволяющие затем найти любые требуемые характеристики в любой точке области решения. Это существенно с точки зрения простоты практического использования полученного решения. Коды программы реализованы авторами на языке С. Написанная программа протестирована сравнением с известными аналитическими решениями [3; 4; 5]. Сравнение показало хорошее качественное и количественное соответствие имеющимся результатам других авторов. Проведено численное исследование задачи взаимного влияния дискообразных плоских трещин. Рассматривались круглые и эллиптические плоские трещины разной взаимной ориентации и расположения в пространстве [6; 7]. В качестве меры взаимного влияния использовались величины коэффициентов интенсивности напряжений (КИН). Исследования показали, что в отличие от трещин плоской деформации для трёхмерных трещин расстояние их существенного взаимного влияния намного меньше. Этот факт говорит в пользу использования трёхмерной постановки задач механики прочности при наличии дефектов в виде трещин.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-07-01111.  
Литература*

1. С. Крауч, А. Старфилд. Методы граничных элементов в механике твердого тела. М. : Мир, 1987. –328 с.
  2. М.А. Алекеидзе. Решение граничных задач методом разложения по неортогональным функциям. М. : Изд. «Наука». 1978.
  3. Уфлянд Я.С. Интегральные преобразования в задачах теории упругости. Л. : Изд-во «Наука». 1967. – 402 с.
  4. Гольдштейн Р.В. Плоская трещина произвольного разрыва в упругой среде // 7 Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1979. № 3. С. 111–126.
  5. M.K. Kassir and G.C. Sih. External crack in elastic solid // The international Journal of Fracture Mechanics. Vol. 4, N. 4, 1968, p. 347–356.
  6. Акулич А.В., Звягин А.В., Шамина А.А. Численное моделирование взаимодействия диско-образных трещин в трехмерном упругом пространстве. В сборнике XVII Международная конференция «Супервычисления и математическое моделирование», место издания РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров. 2018.
  7. Звягин А.В., Смирнов Н.Н., Панфилов Д.И., Шамина А.А. Метод граничных элементов для численного решения трехмерных задач механики трещин // Вестник кибернетики. Изд-во СурГУ (Сургут), том 30, № 2, 2018, с. 18–31.
- 

## ИНИЦИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦА ИСКУССТВЕННОГО ПЕСЧАНИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

*Зейгарник В.А., Ключкин В.Н., Окунев В.И.*

*zeigarnik@ihed.ras.ru*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия

В эксперименте с образцом искусственного песчаника (№ 11) было зафиксировано разрушение образца вследствие воздействия импульсом постоянного электрического тока. Эксперимент проводился на рычажном прессе. Описание пресса и его характеристики приведены в предыдущих публикациях авторов. Пресс позволяет реализовать фазу квазистатического состояния, при котором приложенная к образцу нагрузка может меняться в крайне ограниченных пределах лишь за счет происходящих в образце релаксационных процессов. Уровень нагрузки в момент подачи импульса постоянного тока составлял около 1,5 МПа. Длительность токового импульса, а также предшествующих и последующих периодов времени определялись на основе поведения образца в процессе эксперимента. Образец был пропитан 1%-ным раствором поваренной соли. Открытая пористость составляла почти 20%, что заметно превышает ее значение у других образцов подобного рода. Это обстоятельство в свою очередь предопределило относительно невысокую прочность данного образца. В процессе эксперимента изменились число интенсивности акустической эмиссии, изменения продольного и двух поперечных размеров (на противоположных боковых гранях), величина тока и температура боковой поверхности. Длительность воздействия постоянным электрическим током порядка 200 мА (плотность тока составляла порядка  $25 \cdot 10^{-3}$  А/см<sup>2</sup>) до момента разрушения составила 720 с. При этом температура наружной поверхности образца за указанное время возросла на 2,3 градуса. Такой нагрев образца мог привести к заметным дополнительным напряжениям внутри образца и интенсификации процесса трещинообразования. Предполагается проведение дополнительных экспериментов на подобных образцах с целью проверки воспроизводимости полученного результата.

# **ИЗМЕНЕНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ УЛЬТРАНИЗКОПРОНИЦАЕМЫХ ПОРИСТЫХ СРЕД ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКИ**

**Зенченко Е.В., Турунтаев С.Б., Барышников Н.А.**

nabarysh@gmail.com

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

Задача данного исследования заключалась в изучении долговременной реакции фильтрационных свойств образца пористой породы на внешнее сжимающее давление. В ходе работы была получена экспериментальная зависимость проницаемости ультранизкопроницаемого образца известняка от времени в ходе цикла нагружение – разгрузка с продолжительностью 29 суток. Также проведено экспериментальное исследование процесса установления фильтрационного потока в исследуемом образце. Показано, что характерное время установления потока, как полученное из теоретических оценок, так и измеренное гораздо меньше характерных времён, на которых происходило изменение проницаемости в ходе основного опыта по нагружению. Ранее нами были проведены серия опытов по кратковременному нагружению более проницаемых известняковых образцов [1]. Опыты показали относительно слабую реакцию проницаемости на внешнюю нагрузку. В ходе ступенчатого цикла нагружения – разгрузки за время проведения опыта (порядка двух часов) проницаемость образцов необратимо уменьшалась на величину 3–5% от исходной. В результате опыта по долговременному нагружению установлено, что изменение проницаемости при тех же нагрузках на больших временах может быть гораздо значительней: в течение месяца проницаемость исследуемого образца снизилась более чем в полтора раза. При этом практически отсутствовала видимая упругая реакция образца на резкое повышение нагрузки, а всё изменение проницаемости происходило в процессе его вязкого деформирования. Это явление требует дальнейшего изучения, особенно в связи с увеличением роли разработки низкопроницаемых пород в добывче ископаемых углеводородов. Подобные породы могут быть подвержены значительной компакции в ходе разработки. В большинстве случаев эта компакция необратима, и, следовательно, не может быть описана при помощи традиционной теории пороупругости. Это может приводить к неверным оценкам изменения фильтрационных свойств коллекторов в процессе разработки. Понимание механики деформирования важно для оценки объёмов извлекаемых запасов углеводородов, а также при построении гидродинамический модели месторождения и при планировании применения мер интенсификации нефтедобычи, в частности, при проведении гидроразрыва пласта.

## **Литература**

1. Архипов Я.Д., Барышников Н.А., Зенченко Е.В., Турунтаев С.Б. Изменение фильтрационных свойств малопроницаемых пористых сред под воздействием внешней нагрузки // Динамические процессы в геосферах. 2017. № 9. С. 68–75.

# АКТИВНЫЙ И ПАССИВНЫЙ АКУСТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА В ЛАБОРАТОРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

<sup>1</sup>Зенченко Е.В., <sup>1</sup>Зенченко П.Е., <sup>2</sup>Лукина А.А., <sup>1</sup>Турунтаев С.Б.

e-mail: zenchev@gmail.com

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», Долгопрудный, Россия

Представлены результаты лабораторных экспериментов по гидроразрыву пласта с использованием методов активного и пассивного акустического мониторинга трещины ГРП. Эксперименты проводились на установке трёхосного нагружения. В зависимости от величины действующих сжимающих напряжений по различным осям нагружения возможно получение как продольных, проходящих вдоль оси скважины, так и поперечных, перпендикулярных скважине, трещин ГРП. Пьезоэлектрические преобразователи, смонтированные в крышках установки, позволяют принимать как импульсы акустической эмиссии, связанные с процессами в модели коллектора, так и ультразвуковые импульсы от преобразователей, работающих в режиме излучателей. Решение задачи локации позволяет установить пространственные координаты источников акустической эмиссии и момент времени излучения импульса. В эксперименте с образованием продольной трещины ГРП было установлено, что зарегистрированные источники акустической эмиссии находились вблизи трещины, отдаляясь от скважины с течением времени. В предположении, что источники расположены вблизи носика трещины, была оценена скорость распространения трещины. При активном акустическом мониторинге излучатель посылает ультразвуковые импульсы через заданные интервалы времени. Пересечение трещиной линии излучатель-приёмник вызывает изменение принятого сигнала. Расположение источников и приёмников непосредственно в крышках установки приводит к паразитным отражениям излучаемого сигнала, усложняя принимаемую волновую форму. На основании проведённого анализа отраженных и преломлённых ультразвуковых волн, из записей принятых сигналов выделялись невозмущённые части и сравнивались между собой. Для сравнения использовался такой интегральный критерий, как сумма квадратов амплитуд выделенных сигналов, что позволило повысить чувствительность метода. При своём распространении трещина ГРП пересекает несколько трасс излучатель-приёмник, что также позволяет оценить скорость её распространения. Проведенные эксперименты показали, что использование обоих методов акустического мониторинга в лабораторных экспериментах по гидроразрыву пласта позволяет получить важную информацию о распространении трещины гидроразрыва. При этом надо учитывать, что не во всех модельных средах пассивный мониторинг хорошо работает из-за слабой акустической эмиссии, а также требует значительных вычислительных ресурсов, что затрудняет его использование в реальном времени. Активный мониторинг менее зависит от свойств модельной среды и в ряде случаев, при визуализации принимаемых ультразвуковых импульсов, позволяет оценивать положение трещины ГРП в ходе эксперимента.

# СЕЙСМИЧЕСКИЕ ТРИГГЕРЫ РАЗВИТИЯ РУДООБРАЗУЮЩИХ СИСТЕМ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА

Злобина Т.М., Петров В.А., Прокофьев В.Ю.,  
Мурашов К.Ю., Котов А.А., Лексин А.Б.

tatiana1946@yandex.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии  
рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии, Москва, Россия

В пространствах фазовых состояний палео-сейсмодинамических и флюидных систем изучены режимы функционирования и преобразования рудообразующих систем четырех гидротермальных месторождений золота. Переменные параметры напряженно-деформированного состояния (НДС) среды реконструированы по сопряженным кварц-золоторудным прожилкам и фазовым портретам изменения ориентировок векторов деформаций-напряжений. Изменчивость поля напряжений определялась по вариациям значений детерминантов тензоров девиаторов, а степень неустойчивости – по оценкам асимметрии тензоров  $k_1, k_2, k_3$ . Переменные величины термобарогеохимических параметров флюидных систем (ФС) (давление, плотность, температура, соленость, химический состав, изотопный состав  $\delta^{13}\text{C}/\delta^{12}\text{C}$  из CO<sub>2</sub>-газ) получены при исследовании на установке THMSG-600 «Linkam» флюидных включений (ФВ) в золоторудном кварце, захваченных в процессе минералообразования. Для оценки параметров применены методы [1; 2; 3; 4]. Рудообразующие газ-гидратные ФС имеют относительно схожие фазовый и химический составы, но отличающиеся давления и температуры. Миграция флюидов из области их генерации в сферу концентрации руд происходила в отличающихся режимах НДС среды. Транспорт флюидов Догалдынской и Вернинской ФС осуществлялся при инверсии  $\sigma_3 \leftrightarrow \sigma_2$ , вызвавшей возвратные «мятниковые» деформации с качанием плана BC вокруг A( $\sigma_1$ ) в плоскости сдвигово-надвига. Механизм палеодеформаций, схож с сейсмическим, обусловленным перераспределением напряжений между  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  через  $\sigma_2$  в очаге DC-типа (Double Couple). Он способен обеспечить пульсационную подкачку флюидов под давлением 2–3 кбар по принципу насоса в направлениях, контролируемых ориентировками осей В деформаций. Флюиды Уряхской и Ирокиндинской ФС, поступавшие под большим давлением ( $P > 3$ –4 кбар) в разломы зоны сдвигов, изменили НДС среды, вызвали угасание сдвига и фазовый переход линейной сейсмодинамической системы DC-типа в центроидную NDC-типа (Non Double Couple), имеющую новую ось (H) симметрии деформаций. Транспорт флюидов поддерживался здесь одноосным вихревым полем, а направления миграции в сфере накопления руд контролировались ориентировкой оси симметрии деформаций H. Предполагается, что фазовый переход сейсмодинамической системы в новый режим вызвал преобразования ФС, выявленные при изучении ФВ: изменение pH растворов; инверсия кислотного режима в щелочной (Уряхская ФС) и шелочной в кислотный (Ирокиндинская ФС); фракционирование изотопов углерода в газовой фазе CO<sub>2</sub> по тренду утяжеления изотопного состава  $\delta^{13}\text{C}/\delta^{12}\text{C}$ .

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-05-01167 и Программы Президиума РАН № 48-П.

## Литература

1. Борисенко А.С. Изучение солевого состава газово-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16–27.
2. Кряжев С.Г., Прокофьев В.Ю., Васюта Ю.В. Использование метода ICP MS при анализе состава рудообразующих флюидов // Вестник МГУ. Серия 4 Геология. 2006. № 4. С. 30–36.

3. Brown P. FLINCOR: a computer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data // Amer. Mineralogist. 1989. V. 74. P. 1390–1393.
  4. Collins P.L.P. Gas hydrates in CO<sub>2</sub>-bearing fluid inclusions and the use of freezing data for estimation of salinity // Economic Geology. 1979. V. 74. P. 1435–1444.
- 

## ДИНАМИКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ЮЖНОЙ КАЛИФОРНИИ ДО И ПОСЛЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ГЕКТОР МАЙН (1999, M = 7.1)

**Зотов О.Д.**

e-mail: ozotov@inbox.ru

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

Исследование посвящено результатам изучения особенностей процесса подготовки и реакции сейсмоактивного региона на триггерное воздействие – главный толчок. Объектом анализа послужило крупнейшее землетрясение с M = 7.1 в Южной Калифорнии, известное под названием землетрясение Гектор Майн. Для анализа использованы данные региональных каталогов землетрясений Северной Калифорнии с 1968 по 2007 годы (<http://www.ncedc.org>) и Южной Калифорнии с 1983 по 2008 годы (<https://www.scec.org>). Рассмотрена динамика сейсмической активности до и после главного толчка. Анализ динамики проводился с точностью до суток. Показано, что в очаговой зоне и на расстояниях много больших размера очаговой зоны наблюдаются сейсмическое молчание (затишье) перед главным толчком и активизация сейсмической активности после главного толчка. Обнаружено, что на всей территории Южной Калифорнии и даже на части территории Северной Калифорнии регистрируются признаки подготовки землетрясения Гектор Майн. Наблюдается уменьшение средней магнитуды землетрясений за 10–30 дней до главного толчка. После главного толчка на всей территории Южной Калифорнии и частично на территории Северной Калифорнии наблюдается увеличение числа землетрясений. Представлены результаты поиска и анализа аналогичных, обладающих свойством «дальнодействия», главных толчков на территории Северной и Южной Калифорнии. Дополнительно рассмотрены главные толчки по данным мирового каталога землетрясений USGS/NEIC с 1973 по 2014 годы (<https://www.usgs.gov>).

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проекта РФФИ № 18-05-00096, а также программ государственных заданий Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.*

---

## ТРИГГЕРНЫЙ РЕЖИМ В ДИНАМИКЕ МАГНИТОСФЕРЫ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АР-ИНДЕКСА И ПАРАМЕТРА $\beta$

**Зотов О.Д., Клейн Б.И., Куражковская Н.А.**

ozotov@inbox.ru

Геофизическая обсерватория Борок, филиал ФГБУН Института физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Борок, Россия

Работа посвящена исследованию особенностей динамики земной магнитосферы. Ранее нами было обнаружено, что в каждом из 11-летних циклов солнечной активности динамика активности магнитосферы (Ар-индекс) демонстрирует резкий переход (триггерный режим) от «периодического» режима к «хаотическому». Также было показано, что триггерный режим Ар-индекса определяется динамикой параметра солнечного ветра  $\beta$  ( $\beta$  – отношение плазменного давления к магнитному). Смена режима в динамике магнитосферы определяется величиной  $\beta$ . При

$\beta < 1$  в магнитосфере наблюдается «хаотический» режим, при  $\beta > 1$  – «периодический». Данная работа посвящена исследованию статистических свойств солнечной активности (числа пятен Вольфа), Ар-индекса и параметра  $\beta$ , соответствующих «периодическому» и «хаотическому» режимам. Для анализа использованы ряды суточных значений с 1932 по 2016 гг. Показано, что усредненная динамика параметра хаотичности солнечной активности и амплитуды параметра  $\beta$  хорошо коррелируют друг с другом в 11-летнем цикле. Найдено, что распределения Ар-индекса для интервалов «хаоса» и «периодичности» описываются степенным законом (так называемое распределение с тяжелым хвостом). Однако показатель степени для интервалов «хаоса» почти в 2 раза отличается от показателя степени для интервалов «периодичности». В этих же интервалах обнаружено различие в спектральных характеристиках Ар-индекса. Показано, что зависимость Ар-индекса от среднего значения параметра  $\beta$  при  $\beta > 1$  хорошо аппроксимируется степенной зависимостью. При  $\beta < 1$  зависимость практически отсутствует. Известно, что изменение  $\beta$  в 11-летнем цикле солнечной активности определяется динамикой угла наклона оси магнитного диполя Солнца к плоскости эклиптики. Таким образом, полученные результаты подтверждают выдвинутую нами ранее гипотезу, что глобальным геоэффективным фактором, определяющим рассматриваемые особенности динамики активности магнитосферы, является угол наклона оси магнитного диполя Солнца.

*Работа частично поддержана программами государственных заданий Института физики Земли им. Шмидта РАН.*

---

## АКУСТИЧЕСКАЯ ФЛЮИДИЗАЦИЯ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ УДАРНЫХ КРАТЕРОВ

**Иванов Б.А.**

[boris\\_a\\_ivanov@mail.ru](mailto:boris_a_ivanov@mail.ru)

ФГБУН Институт динамики геосфер РАН, Москва, Россия

Попытка объяснить видимое временное уменьшение внутреннего (сухого) трения в разрушенной горной породе вокруг образующегося ударного кратера привела к модели акустической флюидизации (АФ), используемой более 20 лет [1; 2]. С помощью этой АФ модели удалось воспроизвести эволюцию геометрии ударных кратеров с увеличением их размера от простых чашеобразных кратеров к сложным кратерам с центральным поднятием (центральная горка, концентрические кольца). В то же время физический механизм АФ остается во многом неясным [3]. Основным методом параметризации АФ остается подгонка параметров под наблюдаемую форму ударного кратера (например, [4; 5]). Продолжая попытки понять механизм АФ мы сравниваем модельные параметры (такие как амплитуда и время затухания внутренних колебаний), найденные путем численного моделирования формы ударных кратеров на планетных телах с различной силой тяжести – от Земли ( $g = 9.8 \text{ м/с}^2$ ) до астероида Веста ( $g \sim 0.22 \text{ м/с}^2$ ). Предварительный сводный анализ по успешному моделированию показывает, что в первом приближении наблюдается линейная зависимость модельного времени затухания внутренних колебаний  $T_{dec}$  от финального диаметра сложных кратеров с центральным поднятием  $Drim$ . Численно  $T_{dec}$  (в секундах) примерно равна  $Drim$  (в км). Для самого маленького из земных сложных кратеров (Штейнхейм,  $Drim \sim 3.8 \text{ км}$ ) наилучший модельный вариант дает  $T_{dec}$  порядка 6 с. Для самого большого из смоделированных кратера на астероиде Веста ( $Drim \sim 500 \text{ км}$ ) наилучшая подгонка дает  $T_{dec}$  в диапазоне от 800 до 900 с. Вместе с тем характеристическое литостатическое давление в зоне кратерообразующего течения (на глубине  $\sim Drim/8$ ) при переходе от Земли к Весте

меняется, например, при  $D_{rim} \sim 100$  км от  $\sim 300$  до  $\sim 7$  МПа, то есть примерно в 40 раз. Таким образом, затухание колебаний в модели АФ не связано с абсолютным уровнем напряжений в движущейся среде, что позволяет сузить круг возможных механизмов, ответственных за временное динамическое снижение внутреннего трения в горных породах вблизи формирующегося кратера.

#### Литература

1. *Melosh, H.J. (1979) // J.Geophys. Res. 84, 7513-7520.*
2. *Melosh H.J., Ivanov B.A. (1999) // Annu. Rev. Earth Plant. Sci., 27, 385-415.*
3. *Rae, A.S.P. et al. (2017) // Meteoritics and Planet. Sci. 52, 1330–1350.*
4. *Ivanov, B.A. (2005) // Solar Sys. Res. 39, 381-409.*
5. *Ivanov B.A. and Melosh, H.J. (2013) // J. Geophys. Res. E: Planets, 118, (7), 1545–155.*

---

## ФОРМАЛИЗОВАННЫЙ ЛИНЕАМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ КАК ОСНОВА СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПЛАТФОРМЕННОЙ ТЕРРИТОРИИ (НА ПРИМЕРЕ КУРСКОЙ АЭС)

**Иванченко Г.Н., Кишикина С.Б.**

ivanchenko@idg.chph.ras.ru

ФГБУН Институт динамики геосфер РАН, Москва, Россия

Исходя из современных представлений о механике землетрясений, сейсмический мониторинг должен быть направлен не просто на общее исследование контролируемой территории, но, главным образом, на области наиболее вероятных зон возникновения сейсмических событий: на зоны разломов. Что формирует одно из направлений работ: развитие методов оценки геодинамических условий региона расположения объекта мониторинга. В условиях платформенных территорий это весьма нетривиальная задача. Мы используем автоматизированные методы линеаментного анализа и подбора параметров обработки цифровых изображений для решения задач описания современной геодинамической обстановки района. Применение статистически достоверных параметров, например, характеристики угловой статистики, полученные на базе большой выборки автоматически выделенных малых фотолинеаментов, позволяет ослабить влияние шумов, связанных с линейными элементами изображения техногенной природы. Из природных факторов автоматический анализ позволяет, например, надежно выделять такие элементы рельефа, как эрозионная сеть; в результате наблюдается хорошее совпадение результатов линеаментного анализа космоснимков и цифровых моделей рельефа. При такой обработке зависимость от субъективного взгляда эксперта существенно уменьшается. При этом индивидуальность экспертной оценки не исчезает, но в большой степени формализуется, что, в свою очередь, приводит к большей устойчивости результатов. Именно с этапа формализованного линеаментного анализа геодинамических условий района начинаются все работы по сейсмическому мониторингу площадок АЭС, проводимые ИДГ РАН. В качестве примера рассмотрен анализ современных и неотектонических геодинамических процессов в районе площадки Курской АЭС-2. Применен комплексный подход, включающий анализ результатов визуального и автоматизированного дешифрирования космических снимков в сочетании со стратиграфическим методом оценки неоген-четвертичных вертикальных деформаций. Показано, что геодинамическая обстановка изучаемого района характерна для стабильных платформенных территорий с тенденцией к медленному слабо дифференцированному воздыманию в условиях регионального сжатия, не превосходящего пределов прочности основных разломных зон региона. Такая обстановка не предполагает сколь-либо заметной местной сейсмичности,

что подтверждается и результатами сейсмологических наблюдений.

*Работа выполнена в рамках госзадания № 0146-2019-0006 и по проекту РФФИ  
№ 19-05-00378.*

---

## **АНОМАЛЬНО ВЫСОКОЕ ПЛАСТОВОЕ ДАВЛЕНИЕ В СРЕДЕ С ДВОЙНОЙ ПОРИСТОСТЬЮ: КОНТИНУАЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

*Извеков О.Я., Чепрасов И.А.*

*izvekov\_o@inbox.ru*

Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

Аномально высокое пластовое давление (АВПД) является распространенным явлением в пластовых отложениях со сверхнизкой проницаемостью, таких как газо- и нефтенасыщенные сланцы. Основными причинами формирования АВПД являются разложение керогена в нефтематеринской породе в условиях сверхнизкой проницаемости и неравновесное уплотнение. АВПД может привести к развитию вторичных трещин в породе с низкой проницаемостью. Подобное явление (автофлюидоразрывы) хорошо известно и обсуждается в литературе. Для континуального описания поведения трещиновато-пористых сред, как правило, используется модель двойной пористости. Трещиновато-пористые среды характеризуются наличием низкопроницаемой матрицы, содержащей основную часть флюида, и системой проводящих трещин, имеющих как природное, так и техногенное происхождение (например, технология многостадийного гидроразрыва на сланцевых месторождениях предполагает искусственное создание сетки проводящих каналов). В основе модели двойной пористости лежит описание суперпозиции трех континуумов: двух флюидов, между которыми осуществляется обмен массой, и твердого скелета. Один флюид образован жидкостью в матрице, а другой флюид жидкостью в трещинах. В работе развивается термодинамически согласованная модель среды с двойной пористостью, хрупкая матрица которой способна накапливать микроразрушения под действием АВПД. Предполагается, что среда пороупруга и изотропна, матрица и система трещин насыщены одной и той же жидкостью. Разрушение матрицы описывается с помощью теории поврежденности Кондаурова и учитывается в усилении массообмена между матрицей и системой магистральных трещин, а также в снижении упругих модулей породы. Для простоты предполагается, что поврежденность вызывается только АВПД, т.е. не рассматривается сдвиговое разрушение. Рассмотрена задача о распространении слабых разрывов в такой среде, определены типы возможных слабых разрывов и характеристические скорости.

---

## **ДИНАМИКА ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В КОНВЕКТИВНЫХ ВИХРЯХ У ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ: АНАЛОГИИ С МАРСОМ**

*<sup>1,2</sup>Извекова Ю.Н., <sup>1,2,3</sup>Попель С.И., <sup>2</sup>Извеков О.Я.*

*besedina\_yn@mail.ru*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

Работа посвящена изучению динамики пылевых частиц в конвективных вихрях над поверхностью Земли и Марса. Пылевые вихри (пылевые смерчи или

пылевые дьяволы) часто возникают в условиях земной и марсианской атмосферы. Особенностью этого типа вихрей является вовлечение в движение большого количества пыли с подстилающей поверхности. Вихри возникают над хорошо прогретыми поверхностями в результате конвективной неустойчивости. Характерные размеры этих вихрей на Земле составляют от порядка нескольких метров до нескольких сот метров, на Марсе же размеры подобных вихрей могут в десятки раз превышать размеры земных. Вращаясь в вихре, пылевые частицы сталкиваются и приобретают электрические заряды, после чего в результате пространственного разделения зарядов возникает макромасштабное электрическое поле. Исследование динамики вихрей и пылевых частиц в них в марсианской атмосфере представляет существенный интерес, в частности, из-за существенного вклада пыли в радиационный баланс в условиях разреженной атмосферы. Наблюдения и прямые измерения параметров земных пылевых вихрей над пустынными поверхностями на Земле возможны и периодически проводятся. Аналогичные измерения на Марсе затруднены. В данной работе предлагается использовать теорию подобия для предсказания параметров марсианских вихрей, используя данные, полученные на Земле. Моделируется поведение пылевых частиц в вихре с учетом сил различной природы, в том числе, учитывается влияние электрического поля, генерируемого вихрем, на траектории пылевых частиц в вихре.

*Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 18-72-00119) и РФФИ (проект № 18-02-00341).*

---

## **ЭФФЕКТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ КОРАБЛЕЙ «ПРОГРЕСС» НА ИОНОСФЕРУ ПО ДАННЫМ GPS ПРИЕМНИКОВ ЯПОНСКОЙ СЕТИ GEONET**

**<sup>1</sup>Ишин А.Б., <sup>2</sup>Воейков С.В., <sup>2</sup>Хахинов В.В.**

ishin@iszf.irk.ru

<sup>1</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

В течение ряда лет с помощью инструментов Института солнечно-земной физики СО РАН проводились эксперименты по определению параметров ионосферных эффектов воздействия реактивных двигателей транспортно-грузовых кораблей «Прогресс». В том числе, для обнаружения возмущений в полном электронном содержании, привлекались данные сибирской сети SibNet приемников GPS/ ГЛОНАСС. Удалось зарегистрировать отрицательные возмущения в вариациях полного электронного содержания [1]. Однако малое число наблюдательных станций и в целом недостаточная плотность сети не позволили надежно проследить динамику возмущения как в пространстве, так и во времени. Помимо недавно развернутой сети SibNet, существуют региональные сети приемников GPS/ ГЛОНАСС, функционирующие на постоянной основе и обладающие достаточной плотностью станций и достаточным их количеством, для проведения более детальных экспериментов. В настоящем исследовании в качестве исходных данных были использованы данные японской сети GEONET станций GPS. С одной стороны, регистрация ионосферных параметров в сети GEONET происходит только 1 раз в 30 секунд, с другой стороны, указанная сеть обладает куда большей плотностью, чем используемая ранее SibNet. Для анализа был взят случай включения реактивных двигателей транспортно-грузового корабля «Прогресс» 4 мая 2006 года. Часть траектории с включенными двигателями находилась в 180 километрах от острова Хоккайдо. На

фоне достаточно малых по амплитуде фоновых вариаций, обусловленных низкой геомагнитной активностью, удалось обнаружить уменьшение полного электронного содержания на 0.06 ТЕСУ. При этом скорость изменения полного электронного содержания, оцениваемая по величине производной, оказывается в 5 раз больше фоновых значений. Указанный эффект наблюдается на лучах, проходящих на расстоянии до 50 километров от области воздействия. В дальнейшем наблюдается восстановление полного электронного содержания до фоновых значений в течение 3–5 минут.

#### Литература

1. Ишин А.Б., Войков С.В., Перевалова Н.П. Комплексный анализ реакции ионосферы на работу двигательных установок тгк «прогресс» по данным гнсс-приемников в Байкальском регионе. Солнечно-Земная физика. 2017. Т. 3, № 4. С. 93–103

---

## ТРИГГЕРНОЕ ТЕРМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА РАЗВИТИЕ МИКРОДЕФЕКТОВ СТРУКТУРЫ ГОРНОЙ ПОРОДЫ, СФОРМИРОВАННЫХ В ХОДЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

**Казначеев П.А., Майбук З.Я., Пономарев А.В., Патонин А.В.**

p\_a\_k@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

В работе исследовано триггерное (инициирующее) влияние термического воздействия на рост микродефектов (трещин), предварительно сформировавшихся в образце горной породы при механическом нагружении. Эксперименты проведены с образцами песчаника осадочного происхождения и песчаника, частично подвергшегося метаморфизации при высоких рТ-условиях. Предварительное механическое нагружение осуществлялось на лабораторном прессе в одноосном режиме до нагрузки, близкой к разрушающей, но до появления макроразрывов. Термическое воздействие осуществлялось на специально разработанной для этого лабораторной установке, обеспечивающей контролируемый нагрев и охлаждение образца горной породы вплоть до температуры 700°C. Для отслеживания развития термически стимулированных разрушений производилась регистрация импульсов термоакустической эмиссии. Идентификация актов роста предварительно сформированных трещин была основана на кластеризации регистрируемых импульсов термоакустической эмиссии. Отдельно проводились контрольные эксперименты с термическим воздействием на образцы породы, не подвергавшиеся предварительному механическому нагружению. Результаты экспериментов показали, что в случае предварительно нагружавшейся породы удается выделить несколько кластеров импульсов термоакустической эмиссии. Предположительно, каждый кластер соответствует своей трещине. Распределение импульсов из кластеров во времени и по амплитудам в процессе нагрева говорит как о разном моменте и пороге активации соответствующей трещины, так и о разных интенсивностях событий роста трещин. Импульсы из кластеров наблюдаются как во время нагрева, так и во время охлаждения образца. На контрольных образцах не только песчаников, но и других горных пород выделить устойчивые кластеры импульсов в процессе термического воздействия не удалось. Анализ результатов говорит о возможном инициирующем действии термомеханических напряжений на рост трещин, предварительно сформированных в образцах горных пород при механическом нагружении. Динамика импульсов из кластеров в процессе нагрева показывает, что одни

трещины устойчиво растут во время всего термического воздействия, в то время как рост других активизируется на некотором этапе нагрева. Начало роста трещин соответствует разной температуре, что, возможно, связано с разным уровнем напряженного состояния около трещин. В предварительно нагружавшихся образцах трещины наблюдались визуально, но отождествить их с растущими трещинами при термическом воздействии не удалось. Отсутствие кластеров импульсов для ненагружавшихся образцов говорит о различии механизмов термического разрушения без предварительного механического нагружения и после него.

*Работа выполнена в рамках гос. задания ИФЗ РАН по теме № 0144-2014-0096 и при финансовой поддержке мегагранта Минобрнауки РФ 14.W03.31.0033 «Геофизические исследования, мониторинг и прогноз развития катастрофических геодинамических процессов на Дальнем Востоке РФ».*

---

## РАЗРАБОТКА ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЮЖНОЙ ЧАСТИ ЦЕНТРАЛЬНО-САХАЛИНСКОГО РАЗЛОМА

<sup>1</sup>Каменев П.А., <sup>1</sup>Заболотин А.Е., <sup>1</sup>Богомолов Л.М., <sup>2</sup>Мищенко М.А.

bleom@mail.ru

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, Южно-Сахалинск, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космофизики и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук, с. Паратунка, Россия

Значительная часть населения Сахалинской области проживает в непосредственной близости от Центрально-Сахалинского разлома (ЦСР), точнее южной его части. Наблюдение за сейсмической активностью в этой зоне, контроль напряжений и деформаций коры являются актуальными и открывают перспективу для сейсмических прогнозов. Создание геомеханической модели области активного разлома способно внести существенный вклад в эти задачи. Предпосылками разработки этой модели были исследования, проведенные коллективом ИМГиГ ДВО РАН совместно с другими структурными подразделениями РАН и университетами. Большое значение имела организация пунктов комплексного геофизического мониторинга. В структурном плане южная часть зоны ЦСР представляет собой систему взбросо-надвигов. Выбранная зона моделирования представлена Центрально-Сахалинским и оперяющим Апреловским разломом. Плоскости сместителей обеих ветвей разлома наклонены на запад под углами 60–80° при выходе на дневную поверхность с постепенным выпиранием с глубиной до 20–300 на глубинах 10–15 км. Разработка геомеханической модели, описывающей распределение напряжений и деформаций в пространстве и их эволюцию во времени, проведена для южной части ЦСР. Границами модели стали грани параллелепипеда со сторонами 150 км в меридиональном направлении, 60 км в субширотном направлении и глубиной 30 км. Географически модель приурочена к координатам в пределах 46.4–47.4° с.ш. и 142.2–142.8° в.д. Графическая модель была создана в программе COMSOL Multiphysics. В качестве исходных натурных данных для модели взяты результаты сейморазведки ГСЗ, каротажа скважин, измерения в пунктах наблюдения GPS, сейсмологические данные. На поверхности выделено 9 разных блоков. По глубине модель разбита на 8 слоев с различными значениями плотностей от 1.9 до 2.78 г/см<sup>3</sup>, модулями Юнга от 1.2

до 44.9 ГПа, коэффициентами Пуассона от 0.27 до 0.28. Скорости деформаций различных блоков варьировались от 1/2 до 2/3 мм в год. Совместное использование геомеханической модели, геофизические методы мониторинга области активного разлома и среднесрочный прогноз различными методами позволяет выделять «проблемные» области разлома, оптимально использовать геофизическую аппаратуру для наблюдений, существенно повысить точность среднесрочного прогноза землетрясений.

---

## **ВОЗМОЖНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В СЕЙСМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

**Камишилин А.Н., Казначеев П.А.**

meslikton5027@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

В данной работе рассматриваются возможные направления исследований сейсмоэлектрических явлений, связанные с взаимодействием полей различной природы и с нелинейностью. В полевых условиях мы исследуем параметрические явления, возникающие в горных породах в результате сейсмоэлектрических преобразований. Геологическая среда, в которой возбуждаются периодические сейсмические колебания, приобретает свойства параметрической электрической колебательной системы. Особое внимание уделено исследованию усиления вторичных электрических колебаний и образованию комбинационных частот. Доказано, что при определенных условиях появляется возможность возникновения параметрического резонанса за счет перекачки упругой энергии в энергию переменного электрического поля, созданного в земле. Высказано предположение о том, что параметрические электрические отклики на упругие колебания могут появляться не только вследствие сейсмоэлектрического эффекта второго рода (СЭЭФ2) – возбуждения вторичного электрического поля в результате упругого воздействия. Причиной электрических откликов также может быть сейсмоэлектрический эффект первого рода (СЭЭФ1) – изменение электрических параметров среды при упругом воздействии. Наблюдавшиеся явления возникновения и усиления параметрических колебаний при сейсмоэлектрических преобразованиях можно назвать, по аналогии с СЭЭФ1 и СЭЭФ2, «сейсмоэлектрическими параметрическими эффектами». В лабораторных условиях исследуется одновременное воздействие двух возбуждающих сейсмических сигналов. Для измерения вторичного электрического поля используется бесконтактное измерение тока, что позволяет минимизировать влияние контактных явлений. Нарушение аддитивности при таком воздействии может свидетельствовать о нелинейном характере СЭЭФ2. Дальнейшее изучение описанных явлений может дать новые сведения о процессах преобразования энергии различных полей в реальной геофизической среде.

*Работа выполнена в рамках гос. задания ИФЗ РАН по теме № 0144-2014-0096 и при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-00698.*

## **АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТЕОРНЫХ ЧАСТИЦ ПО КОМБИНИРОВАННЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ**

<sup>1</sup>*Карташова А.П.,<sup>2</sup>Рыбнов Ю.С.,<sup>2</sup>Попова О.П.,<sup>1</sup>Болгова Г.Т.,*

<sup>2</sup>*Глазачев Д.О.,<sup>2</sup>Ефремов В.В.*

*akartashova@inasan.ru*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

Взаимодействие метеорных тел с атмосферой приводит к генерации как оптического (метеоры), так и акустического (импульсы давления) излучения. Одновременные комбинированные наблюдения метеоров позволяют сопоставить оценки характеристик метеороидов, полученные по разным наблюдательным данным, уточнить модели и методы. В результате оптических наблюдений с нескольких пунктов (Звенигородской обсерватории ИНАСАН, пункта «Истра» и геофизической обсерватории «Михнево» ИДГ РАН) (начиная с 2012 г.) было получено несколько тысяч метеорных регистраций, для которых были определены различные параметры (радиант, геоцентрическая скорость, высота загорания и затухания, звездная величина, орбитальные параметры и др.). В 2014 году сотрудниками ИНАСАН и ИДГ РАН были проведены первые тестовые комбинированные наблюдения, а в 2016 г. наблюдения были продолжены. Акустические наблюдения выполнялись с трех пунктов (на геофизической обсерватории «Михнево» ИДГ РАН, и Звенигородской обсерватории ИНАСАН). Анализ записей инфразвука и их сопоставление с оптическими наблюдениями дал возможность выявить несколько десятков акустических сигналов соответствующих оптическим регистрациям (с нескольких пунктов). Энергии и массы метеорных частиц были оценены по параметрам инфразвуковых сигналов. Были сопоставлены характеристики метеорных частиц, для которых были получены одновременных наблюдения (акустические и оптические). Сравнения масс и энергий, полученные по оптическим и инфразвуковым наблюдениям, показывают значительный разброс величин (до двух порядков и более). Возможное объяснение может включать использование больших неопределенностей во всех используемых приближениях, неточности в определении звездной величины метеоров и другие причины. Эта проблема требует дальнейшего изучения и накопления данных, обе системы наблюдения должны быть улучшены.

---

## **МИГРАЦИЯ ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, КАК ТРИГГЕР КРУПНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ**

<sup>1,2</sup>*Кафтан В.,<sup>2</sup>Мельников А.*

*kaftan@geod.ru*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

Методы наблюдений за движениями и деформациями земной поверхности с использованием глобальных навигационных спутниковых систем сегодня применяются все более широко и эффективно. Это особенно характерно для регионов с высокой сейсмической активностью, например, таких как Западное побережье США, или острова Японского архипелага. В этих регионах плотные сети непрерывных ГНСС наблюдений функционируют уже не одно десятилетие, что способствует накоплению значительных объемов данных о ходе деформаций

земной поверхности за годы сильных землетрясений в местах их реализации. В этой связи возникает особый интерес к анализу долговременных изменений деформационного процесса, с целью регистрации возможных деформационных предвестников и оценки степени накопления деформаций перед сильными землетрясениями. В докладе рассмотрены исследования пространственно-временных изменений горизонтальных деформаций земной поверхности в регионе Сан-Франциско на более чем одиннадцатилетнем интервале с суточным временным разрешением. Проанализированы деформации дилатации, полного сдвига, а также горизонтальные и вертикальные смещения постоянных станций GPS. Исходными данными послужили временные ряды изменений координат, публикуемые Лабораторией Невады Университета Рено, США [1]. Эволюция деформаций и движений земной поверхности отслеживается с использованием кинематических визуализаций, демонстрирующих изменение поля деформации во времени. Созданные анимации дают возможность отследить качественный характер деформирования в связи с ходом сейсмического процесса и разломной тектоникой. Исследуемый регион в последние годы является предметом особого внимания в связи с возможным возникновением катастрофического землетрясения. Визуализация эволюции деформации продемонстрировала зоны активизации и путь распространения деформационных фронтов. Показано, что распространение деформации полного сдвига, развиваясь из середины области простирания разлома Хайвард, мигрирует к разлому West Napa и провоцирует крупное землетрясение Напа,  $M = 6$ . Умеренные землетрясения с  $M > 5$  также возникли при приближении деформационного фронта к их будущим эпицентрам. Скорость распространения деформационного фронта  $\approx 7$  км/год. Величина деформации, провоцирующей событие около  $0.3 \cdot 10^{-5}$ . Зарегистрированное явление расценивается авторами, как триггер корового сейсмического события. Делается вывод, что зона разлома Хайвард в настоящее время является менее сейсмоопасной, как наиболее подвижная.

#### Литература

1. Blewitt, G., W.C. Hammond, and C. Kreemer (2018), Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science, *Eos*, 99, <https://doi.org/10.1029/2018EO104623>.

---

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭНЕРГООБМЕНА В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ АКТИВНЫХ РАЗЛОМОВ (НА ПРИМЕРЕ МАССИВА ПОРОД КИРОВСКОГО РУДНИКА КФ АО «АПАТИТ»)

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

fjulia@mail.ru

<sup>1</sup>Горный институт – обособленное подразделение федерального научного центра Кольский научный центр Российской академии наук, Апатиты, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела ДВО РАН, Хабаровск, Россия

Массив горных пород представляет собой весьма специфическую среду, находящуюся под влиянием гравитационно-тектонических полей напряжений, которые, в свою очередь, обусловлены совместным воздействием гравитации и процессов в глубинных слоях Земли. Анализ результатов инструментальных измерений параметров гравитационно-тектонических полей, выполненных в различных точках мира, позволил исследователям выдвинуть различные гипотезы происхождения тектонических компонентов полей напряжений общего вида. Из этих гипотез наиболее обоснованными являются представления, по которым избыточные горизонтальные напряжения связываются с процессами внутренней тектонической

деятельности Земли, в том числе, с поднятиями магмы по разломам всемирной рифтовой системы, обуславливающие разнонаправленные перемещения тектонических плит земной коры. На основании представлений о гравитационно-тектонических полях стало возможным удовлетворительно объяснить специфические особенности деформирования и разрушения пород в горных выработках и прогнозировать вероятность возникновения горных ударов и техногенных землетрясений. Однако некоторые особенности гравитационно-тектонических полей напряжений массивов пород не получили удовлетворительных объяснений. К таким особенностям относится отсутствие физического обоснования мозаичной структуры изменяющихся гравитационно-тектонических полей напряжений, а также наличие разнонаправленных смещений отдельных структурных блоков различных размеров в пределах существенно меньших по масштабам областей массивов пород, в пределах отдельных регионов, групп месторождений и даже отдельных участков обособленного месторождения. На основании результатов непосредственных многолетних измерений перемещений пород на одном из разломов шахтного поля Кировского рудника КФ АО «Апатит» нами было сформулировано предположение о возникновении горизонтальных напряжений вследствие постоянного подвода энергии из глубинных слоёв Земли по определённым (активным) разломам. Это предположение снимает ряд вышеуказанных вопросов и противоречий и удовлетворительно объясняет многие явления, которые проявляются в массивах пород. Для подтверждения гипотезы о возможной энергетической подпитке через разломные зоны было проведено математическое моделирование методом конечных элементов для участка массива пород Кировского рудника КФ АО «Апатит» между Северным и Саамским разломами. Также выполнен анализ результатов мониторинга изменений сейсмической активности в районе Саамского разлома. На основе полученных данных установлено, что в исследуемом массиве возможно формирование естественных горизонтальных напряжений, существенно превышающих гравитационные, в случае постоянной подпитки энергией через разломные зоны.

---

## О СВЯЗИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И АТМОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ПЕРИОД ПОДГОТОВКИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

*Кашкин В.Б., Одинцов Р.В., Романов А.А., Рублева Т.В., Симонов К.В.*

*simonovkv50@gmail.com*

Сибирский федеральный университет, Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия

Сейсмический процесс и его подготовка непосредственно связаны с геофизической средой, в которой изменение физических параметров одной геосферы, например, литосферы, приводит к возмущениям в другой – атмосфере. Известен эффект влияния сейсмической активности на ионосферу. Изучение ионосферного отклика сейсмособытий основано на использовании сигналов глобальных навигационных систем ГЛОНАСС/GPS и спутниковых данных DEMETER (Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions, France). Тепловые аномалии, возникающие над зонами крупных разломов земной поверхности, изучались А.А. Трониным по спутниковым измерениям в ИК-диапазоне. В данной работе исследуются атмосферные возмущения над сейсмоопасными районами Ближнего Востока по спутниковым данным при подготовке сильных землетрясений и во время основного сейсмического момента. В ноябре 2017 и 2018 годов в этом регионе регистрировались скопления коровых землетрясений (сейсмофокальные

зоны «гнездового» типа). Кроме того, зарегистрированы сильнейшие землетрясения в Ираке 12 ноября 2017 г. в 18:18:17 UTC,  $M = 7.3$  (координаты эпицентра  $34.911^\circ\text{с.ш.}$  и  $45.959^\circ\text{в.д.}$ ), и в Иране 25 ноября 2018 г. в 16:37:32 UTC,  $M = 6.3$  (координаты –  $34.361^\circ\text{с.ш.}$  и  $45.744^\circ\text{в.д.}$ ). Очаги этих землетрясений были расположены в сейсмогенном слое на глубинах 18–19 км в зоне взаимодействия Аравийской и Евроазиатской тектонических плит. В качестве исходной информации использовались данные, полученные с помощью аппаратуры ATOVS (Advanced TIROS Operational Vertical Sounder, KA NOAA/POES, USA). Были построены вертикальные профили температуры для изобарических уровней от 800 до 100 гПа над пиковыми и эпицентральными сейсмозонами. Выполнен корреляционный анализ температурных рядов, отвечающих различным изобарическим уровням. Анализ температурных профилей выявил атмосферные отклики в тропосфере и нижней стратосфере. За сутки до сильнейшего землетрясения  $M = 7.3$  над пиковой зоной температура уменьшилась на 5–7 К как в приповерхностном слое на изобарическом уровне 800 гПа, так и в верхней тропосфере на уровне 300 гПа. В нижней стратосфере на изобарическом уровне 100 гПа в это же время температура повысилась на 6 К. Накануне перед сильным землетрясением наблюдалась температурная аномалия. В день сейсмособытия температура в приземном слое и верхней тропосфере над пиковой зоной повысилась. Такой рост температуры в геосреде вероятно связан с конвекционными процессами, происходящими во время сейсмической активности. Разнонаправленные колебания температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере, выявленные во время подготовки основного сейсмического толчка, можно рассматривать как признаки готовящегося землетрясения.

---

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ И КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЗОНАХ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

*Ким А.С., Шпади Ю.Р., Литвинов Ю.Г.*

kim.as@mail.ru

Институт ионосферы и Институт космической техники и технологий Акционерного Общества «Национальный центр космических исследований и технологий», Алматы, Казахстан

Разработана математическая модель тектонического разлома в породном массиве в условиях возникновения и развития узкой зоны пластичности в его окрестности. Получены расчетные формулы эволюции смещений на разломе и процесса развития линий пластических деформаций. Разработана математическая модель двух взаимодействующих тектонических разломов в условиях возникновения и развития узкой зоны пластичности между ними. Исследованы условия полного перехода перемычки между разломами в пластическое состояние, определено предельное состояние ненарушенной части перемычки. Проведена компьютерная визуализация квазистатических процессов в зоне одиночного разлома в условиях возникновения и развития узкой зоны пластичности в его окрестности: представлены графики времени развития пластических деформаций на продлении разрыва и графики скорости смещений берегов разрыва на границе линии пластичности в зависимости от фоновых напряжений, предела текучести материала в зоне необратимых деформаций; получены эпюры предельных смещений на разрыве. Проведена компьютерная визуализация квазистатических процессов в зоне двух взаимодействующих тектонических разломов с зоной пластических деформаций на перемычке: представлены графики времени развития линии

пластических деформаций до заданной точки на перемычке и построены графики скоростей смещений берегов разрыва на границе линии пластичности в зависимости от фоновых напряжений, предела текучести материала в зоне необратимых деформаций; определено время полного перехода перемычки в пластическое состояние. По результатам математического моделирования и компьютерной визуализации скоростей смещений в зоне локализации пластических деформаций на перемычке между двумя разломами установлено: устойчивая зона перемычки характеризуется бухтообразностью скорости смещений в пластической зоне. Для неустойчивой зоны перемычки бухтообразность скорости смещений в пластической зоне менее выражена, а при активной неустойчивости скорость смещений имеет монотонно возрастающий характер. Проведено математическое моделирование нестационарных процессов в напряженной среде при внезапном возникновении разрыва с контактирующими берегами, используя аналитическое решение А.С. Кима для динамической задачи, моделирующей процесс возникновения землетрясения. Для разрыва с вязким контактом берегов, получено поле смещений в зоне конечного разрыва для первых вступлений сейсмических волн. Проведена компьютерная визуализация развития во времени суммарного поля перемещений в очаговой зоне с учетом поля повторных цилиндрических волн, когда на конечном разрыве происходит полный сброс напряжений. Установлено, что на магистральном разрыве могут происходить реверсные смещения берегов разрыва.

---

## **ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О СЖАТИИ (РАСШИРЕНИИ) ТРУБЫ ИЗ НЕСЖИМАЕМОГО ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА, ПОГРУЖЕННОЙ В НЕСЖИМАЕМУЮ ВЯЗКУЮ ЖИДКОСТЬ, ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНИХ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК**

**Киселев А.Б.**

akis2006@yandex.ru

Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Представлено точное аналитическое решение одномерной задачи расширения (сжатия) цилиндрической трубы из несжимаемого вязкопластического материала типа Соколовского-Пэкины, погруженной в несжимаемую вязкую жидкость Навье-Стокса, под действием внешних динамических нагрузок, произвольным образом зависящих от времени. Задача имеет непосредственное отношение к исследованию реакции трубопровода, проложенного под водой, на кратковременное интенсивное воздействие. Воздействие может быть, в частности, сейсмической природы, взрыв боеприпаса и т.п. Решение получено в лагранжевых переменных, что и сделало возможным получение точного решения, а не приближенного, асимптотического, как в случае применения эйлеровых переменных, которые используются в большинстве исследований по близкой проблематике. Ранее автором доклада были получены точные решения целого ряда близких динамических задач со сферической и цилиндрической симметрией [1–7].

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-01-00151a).  
Литература*

1. Киселев А.Б. Аналитические решения задач об адиабатическом сжатии толстостенных сферических и цилиндрических оболочек из несжимаемого вязкопластического материала // ПММ. 2012. Т. 76, вып. 4. С. 675–679.
2. Киселев А.Б. К исследованию процесса нестационарного расширения толстостенных сферических и цилиндрических вязкопластических оболочек // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 1. Матем. Механ. 2012. № 6. С. 20–25.

3. Киселев А.Б. Аналитические решения задач об адиабатическом сжатии и расширении сферического и цилиндрического слоев из несжимаемой вязкой жидкости // Прикл. физ. и матем. 2013. № 1. С. 88–93.
  4. Киселев А.Б. О динамическом сжатии (расширении) сферической полости в вязкой несжимаемой жидкости. Задача Забабахина // Прикл. физ. и матем. 2014. № 6. С. 42–46.
  5. Киселев А.Б. Дополнение к статье А.Б. Киселева «Аналитические решения об адиабатическом сжатии толстостенных сферических и цилиндрических оболочек из несжимаемого вязкопластического материала» ПММ. 2012. Т.76. Вып. 6. С. 675-679 // ПММ. 2014. Т. 78, вып. 6. С. 858–861.
  6. Киселев А.Б. Аналитические решения динамических задач расширения (сжатия) толстостенных сферических и цилиндрических вязкопластических оболочек, погруженных в вязкую жидкость // Прикл. физ. и матем. 2016. № 2. С. 32–38.
  7. Киселев А.Б. Точные решения одномерных задач расширения (сжатия) полых двухслойных шаров и цилиндрических труб из вязкопластических материалов под действием внешних динамических нагрузок // Прикл. физ. и матем. 2017. № 2. С. 22–30.
- 

## **БАЗОВЫЕ ПРИНЦИПЫ МЕТОДИКИ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ РАЙОНОВ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПЛОЩАДОК АЭС Кишикина С.Б.**

Svetlank@gmail.com

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

Сформулированы базовые принципы методики сейсмического мониторинга для районов расположения площадок АЭС. Несмотря на существующие разработки, представляется, что методики мониторинга должны постоянно развиваться. Формирование систем наблюдения, обработки и анализа данных должны быть достаточно гибкими и находиться в прямой зависимости от современных представлений о сейсмическом процессе и механике землетрясения. Организация сейсмического мониторинга территории размещения особо ответственных объектов в условиях слабоактивных платформенных территорий ставит целый ряд проблем. В первую очередь, традиционные подходы оценки пространственно-временных закономерностей распределения сейсмических событий разного масштаба, набор представительной статистики и оценка параметров графика повторяемости в подобных условиях практически не работают. В частности, из-за существенных трудностей в ходе регистрации и идентификации слабых событий: высокий уровень микросейсмических шумов, наличие в ожидаемом для слабых событий частотном диапазоне огромного количества сейсмических сигналов, в том числе таких, природу источников которых определить не удается. Исходя из таких представлений, сейсмический мониторинг должен быть направлен не просто на общее исследование контролируемой территории, — как правило, это область радиусом от нескольких десятков до нескольких сотен километров (согласно нормативным документам, сейсмический мониторинг площадок АЭС, например, должен контролировать территорию радиусом 300 км вокруг площадки станции), — но, главным образом, на области наиболее вероятных зон возникновения сейсмических событий: на зоны разломов. Таким образом, в основу современной организации сейсмического мониторинга положено представление о базовой роли геодинамических структур в пространственном распределении сейсмических событий. Формализованный линеаментный анализ исследуемой территории позволяет построить структурную модель даже в отсутствии

выраженных активных разломов. Именно структурная модель в совокупности с характеристиками слабых сейсмических событий и параметрами их источников определяют дальнейшую концепцию проведения инструментальных наблюдений: выбор системы наблюдения, характеристик используемой аппаратуры и конкретных мест регистрации сейсмических событий. Ключевым моментом построения системы мониторинга является выбор совокупности контролируемых параметров, опирающихся как на детерминированные, так и на вероятностные подходы к анализу получаемых данных.

*Работа выполнена в рамках госзадания 0146-2019-0006; при поддержке проекта РФФИ № 18-05-00923 (в части анализа микросейсмических шумов).*

---

## ТРИГГЕРНАЯ АКТИВАЦИЯ ВОЗМУЩЕНИЯ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ ОПТИЧЕСКОМ ВОЗБУЖДЕНИИ НЕЙТРАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ СРЕДЫ

**И.Х. Ковалева, А.Т. Ковалев**

akoval@idg.chph.ras.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

Активный ионосферный эксперимент «North Star» показал, что небольшая добавка нейтрального воздуха в ионосферную среду, изменяющая эффективную высоту, может значительно модифицировать результаты эксперимента по инъекции плазменной струи. Вместо быстрого остывания струи, конденсации и рекомбинации атомов алюминия в ней, наличие нейтрального искусственно созданного воздушного облака привело к увеличению уровня ионизации примерно на два порядка величины, значительному искажению магнитного поля с формированием каверны и т.д. Объяснить эти особенности столкновительной ионизацией или фотоионизацией компонент воздушной среды при столкновениях с ускоренными ионами не удается. При этом под действием вспышки ультрафиолетового и оптического излучения, сопровождающей инъекцию плазмы, осуществляется колебательное возбуждение нейтрального воздуха. При резонансном взаимодействии нейтральной и заряженной компонент среды накопленная в колебательном возбуждении энергия может привести к увеличению волнового движения ионов и нейтралов, возникновению ускорения электронов, дальнейшему увеличению уровня возбуждения нейтралов. Показано, что эти процессы приводят к снижению эффективных порогов как ионизации, так и реакций с обменом заряда. В работе рассмотрено влияние такого механизма на увеличение ионизации и активацию процессов перезарядки. Показано, что рассмотренный механизм может быть основным механизмом, ответственным за поддержание высокой степени ионизации плазменной струи. Рассмотрены возможные процессы взаимодействия возбуждённой по данному механизму среды с потоками сверхтепловых электронов, изменение режима эволюции плазменного облака в присутствии данного взаимодействия. Приведена оценка энергетики и времени существования данного механизма

## **УСТОЙЧИВОСТЬ БОРТОВ КАРЬЕРОВ ПРИ ДОБЫЧЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ КЫРГЫЗСТАНА**

**Кожоголов К.Ч., Никольская О.В.**

ifmfp@yandex.ru

Институт геомеханики и освоения недр Национальной академии наук Кыргызской Республики, Бишкек, Кыргызстан

В настоящее время в Кыргызской республике одним из приоритетных направлений развития экономики является решение проблем рационального использования и охраны недр. Отличительной особенностью как эксплуатируемых, так и проектируемых месторождений является то, что в большинстве своем нагорные (Кумтор, Кара-Кече, Джеруй и др.) и приурочены к зонам тектонических разрывных нарушений в виде надвигов, сдвигов и сбросов. По сравнению с равнинными карьерами, нагорные карьеры находятся в стесненном рабочем пространстве и имеют высокую оползневую, селевую и лавинную опасность. При этом деформации бортов нагорных карьеров имеют ряд специфических особенностей, обусловленные тем, что разработке подлежат массивы пород склонов, имеющие сложную историю формирования и геологическое строение. Борт карьера на горном склоне в условиях высокогорья расположен в породном массиве с низкими прочностными характеристиками. При вскрытии породного массива склона обнажаются и раскрываются естественные трещины напластования, тектонические трещины или трещины отдельностей. Запас устойчивости непосредственно склона постоянно меняется, а при строительстве и эксплуатации нагорного карьера изменяется и его геомеханическое состояние. Наличие систем трещин в прибортовом массиве формирует блочное строение и приводит к дизъюнктивным нарушениям с потерей устойчивости отдельных блоков, при этом общая устойчивость борта карьера сохраняется. В блочном массиве, в зависимости от размера блока (геологического индекса массива пород), разрушение борта происходит в пределах наиболее неустойчивого уступа в виде сдвига или опрокидывания в сторону выработанного пространства. Поверхность скольжения представляет собой ломаную линию, состоящую из площадок поверхности трещин, ограничивающих блок. Основными факторами, определяющими устойчивость уступа или борта, являются условия на контактах блоков и отношение высоты уступа  $h$  к линейным размерам структурного блока  $l$ .

---

## **ИЗМЕНЕНИЕ СЕЙСМИЧНОСТИ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВЕДЕНИИ ГОРНЫХ РАБОТ В БЛИЗИ СААМСКОГО РАЗЛОМА НА КИРОВСКОМ РУДНИКЕ КФ АО «АПАТИТ»**

**Козырев А.А., Журавлева О.Г., Жукова С.А.**

svetlana.zhukowa@yandex.ru

Горный институт – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ГоИ КНЦ РАН), Апатиты, Россия

При подземной разработке месторождений полезных ископаемых особенно остро стоит проблема динамического разрушения массива горных пород, в котором пройдены выработки рудников и шахт. Разработка Хибинских апатит-нефелиновых месторождений ведется с 1929 г. открытым способом, с 1933 г. – подземным. Крупномасштабные горные работы оказывают существенное влияние на геодинамический режим геологической среды отрабатываемых месторождений, что подтверждается увеличением сейсмических событий на рудниках. При переходе на

большие глубины резко ухудшаются условия эксплуатации месторождений, так как увеличивается горное давление, изменяются физико-механические свойства и структурные особенности массива горных пород. В данной работе представлены результаты ретроспективного анализа данных микросейсмического мониторинга в районе Саамского разлома, который является одним из наиболее крупных радиальных субвертикальных разломов Хибинского массива. Саамский разлом является разделом между Кукисумчоррским и Юкспорским месторождениями, отрабатываемыми подземным способом. Данный разлом проходит по Саамской долине и одноименному карьеру, заполненному водой, работы в котором на сегодняшний день завершены. Изучение сейсмической активности в районе Саамского разлома в настоящее время особенно важно, т.к. именно такие мощные нарушения оказывают главенствующее влияние на напряженно-деформированное состояние массива и, в первую очередь активизируются под влиянием техногенного воздействия горных работ. Современные горные работы и действующие тектонические процессы приводят к перераспределению напряжений и накоплению потенциальной энергии, которая преобразуется в кинетическую в виде геодинамических проявлений – подвижкам по ранее ослабленным тектоническим нарушениям и растрескиванию массива. При приближении горных работ, связанных как с добычей руды, так и с проходкой горных выработок, к Саамскому разлому происходят изменения напряженно-деформированного состояния массива и сейсмического режима, что проявляется в увеличении числа сейсмических событий и их энергии. Каждое крупное сейсмическое событие предваряется и сопровождается рядом более мелких событий – форшоков и афтершоков. В последнее десятилетие начали происходить мощные (энергия более 10 МДж) сейсмические события в данном районе, что свидетельствует об активизации этого разлома.

---

## **ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА К ПРОГНОЗУ ОПАСНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ РЕТРОСПЕКТИВНЫХ ДАННЫХ В РАЙОНЕ ГОРНО-ТЕКТОНИЧЕСКОГО УДАРА НА РАСВУМЧОРРСКОМ РУДНИКЕ 09.01.2018 г.**

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

*ZhuravlevaOG@goi.kolasc.net.ru*

Горный институт – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия

Представлены результаты многофакторного анализа мощного сейсмического события (магнитуда около 3.3), произошедшего 09 января 2018 г. в 06 часов по московскому времени на Расвумчоррском руднике (месторождение «Апатитовый Цирк»). Гипоцентр события находился в лежачем боку за пределами рудного тела вне зоны ведения очистных работ. Событие сопровождалось сильным звуковым эффектом, сотрясением массива и дневной поверхности, ощущалось как работниками рудника, так и жителями городов Кировск и Апатиты. Разрушения горных выработок зафиксированы в стометровом диапазоне высотных отметок. События такого ранга проявляются на удароопасных месторождениях Хибинского массива с периодичностью 5–10 и более лет. Триггером мощного динамического явления мог быть торцевой взрыв 08.01.2018 г. при достижении самим массивом горных пород предельно неустойчивого состояния. События с подобным механизмом вызывают наиболее мощный сейсмический отклик массива и могут привести к серьезным разрушениям подземных и наземных объектов. В рамках данной

работы применен комплексный подход к прогнозу опасных динамических явлений на основе ретроспективных данных. Рассмотрены геологические, геомеханические и горнотехнические факторы, оказывающие влияние на геодинамический режим данного участка массива. Предложенный комплексный подход основан на совмещении данных вероятностной оценки зон, потенциально опасных по возникновению мощных сейсмических событий энергетического класса 6–8, с данными 3D численного моделирования НДС массива горных пород при учете основных геологических, геомеханических и горнотехнических факторов на нескольких масштабных уровнях. Показано, что совместное применение различных индикаторов уровня сейсмической опасности и параметров НДС конкретного участка при развитии горных работ позволяет повысить надежность прогноза зон сейсмической опасности.

---

## **СЕЙСМИЧНОСТЬ И ПОЛЕ ПОГЛОЩЕНИЯ S-ВОЛН В РАЙОНЕ ГИНДУКУША: ПРОЦЕССЫ ДЕГИДРАТАЦИИ И МИГРАЦИИ ГЛУБИННЫХ ФЛЮИДОВ**

*Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н.*

sokolova@kndc.kz

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

Исследуются пространственно-временные вариации поля поглощения поперечных волн в районе Гиндукуша. Рассматривались отношения максимальных амплитуд в волнах S и P (параметр  $\lg(AS/AP)$ ), который для краткости будем обозначать как S/P) по записям глубокофокусных землетрясений, произошедших в диапазоне глубин 151–270 км, которые были получены станцией ААК в 1993–2016 гг. на эпицентральных расстояниях ~ 700–800 км. Для учета зависимости амплитуд от диаграмм направленности излучения P- и S-волн проводилось осреднение величин S/P в различных интервалах времени. Установлено, что в 1993–2015 гг. в зоне глубокофокусной сейсмичности имели место существенные пространственные вариации поглощения S-волн в разных диапазонах глубин. В то же время значительные временные вариации параметра S/P зарегистрированы только на глубинах 211–270 км. Показано, что в 2013–2015 гг., перед сильнейшим землетрясением 26.10.2015 г. ( $Mw = 7.5$ ,  $h = 231$  км) самое слабое поглощение наблюдалось для гипоцентров, расположенных над очаговой зоной, на глубинах 151–210 км, а самое высокое – на глубинах 231–270 км. После землетрясения поглощение резко уменьшилось на глубинах 231–270 км и увеличилось в диапазоне глубин 191–230 км. Предполагается, что обнаруженные эффекты связаны с процессами дегидратации мантийных пород, а также миграции глубинных флюидов. Данные процессы давно известны в зонах субдукции, однако там они происходят на значительно меньших глубинах (обычно – до 70 км). В конечном счете эти процессы ведут к уменьшению потенциальной энергии нашей планеты.

## **ОСОБЕННОСТИ ФЛЮИДОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СЕЙСМОАКТИВНОМ РЕГИОНЕ (НА ПРИМЕРЕ КАМЧАТКИ)**

**Копылова Г.Н., Болдина С.В.**

gala@emsd.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук» Камчатский филиал (КФ ФИЦ ЕГС РАН), Петропавловск-Камчатский, Россия

Образование очагов землетрясений, как разрывов сплошности горных пород с излучением упругих сейсмических волн, сопряжено с возникновением и развитием флюидодинамических процессов в водонасыщенных породах земной коры сейсмоактивных регионов. Формирование сейсмогенных разрывов вызывает перераспределение статического напряженного состояния флюидонасыщенных горных пород и скачки флюидного давления с амплитудами пропорциональными величине объемной деформации. Излучение сейсмических волн и их распространение вызывает динамическую деформацию горных пород и сопровождается разнообразными эффектами в поверхностных и подземных водах. Наблюдения в скважинах за вариациями уровня воды позволяют выделять гидрогеосейсмические эффекты при землетрясениях (ГГСЭ) и изучать флюидодинамические процессы в системе «скважина – водовмещающая порода» на стадиях образования и подготовки сейсмических очагов. В докладе представлены результаты изучения ГГСЭ в скважине ЮЗ-5, Камчатка, при 19 землетрясениях с  $M_w = 6.8\text{--}9.1$  на эпицентральных расстояниях 80–14600 км. С учетом морфологических особенностей и продолжительности развития выделены четыре типа ГГСЭ: I – колебания уровня воды в течение часов; II – колебания с повышением уровня продолжительностью от минут-часов до суток; III – повышение уровня в течение часов – до суток; IV – длительное (месяцы) понижение уровня воды. Установлено закономерное проявление выделенных типов ГГСЭ в зависимости от параметров землетрясений (соотношения величин магнитуды и эпицентрального расстояния) и параметров сейсмических волн: удельной плотности энергии в сейсмической волне, максимальной горизонтальной скорости и амплитудно-частотного состава максимальных фаз движений грунта по записям на ближайшей сейсмостанции. Проявление различных типов ГГСЭ определяется степенью интенсивности сейсмического воздействия, амплитудно-частотным составом максимальных фаз движений грунта, а также возникновением и развитием специфических гидрогеодинамических процессов в системе «скважина – водовмещающая порода». Рост интенсивности сейсмического воздействия, определяемого по величинам удельной плотности сейсмической энергии в волне и ее максимальной скорости, сопровождается сменой проявлений ГГСЭ от типа I к типу IV. Низкочастотные и низкоамплитудные сейсмические сигналы вызывают колебания уровня воды. При увеличении амплитуды сейсмического сигнала на колебания накладываются кратковременное повышение уровня воды. С ростом частоты и амплитуды сейсмического сигнала более выражены кратковременные повышения уровня воды. При максимальных величинах частоты и амплитуды сигнала, в случаях местных сильных землетрясений, сопровождающихся сотрясениями с интенсивностью  $\geq 5\text{--}6$  баллов по шкале MSK-64 проявляются длительные (месяцы) понижения уровня воды. На отдельных примерах рассмотрены процессы формирования ГГСЭ I–IV типов. Колебания уровня воды возникают вследствие усиления гармонических вариаций давления в скважине по модели [Cooper et al., 1965] при прохождении поверхностных волн с периодом 44 с. Кратковременные повышения уровня воды отражают импульсный рост давления и эффекты нелинейной фильтрации в

водовмещающих породах [Кочарян и др., 2011] вблизи ствола скважины. При этом амплитуда увеличения напора не превышает первые см водяного столба при времени релаксации импульса давления не более первых десятков минут. Длительное понижение уровня воды обусловлено падением напора (понижением флюидного давления) с амплитудами от десятков см до 1 м водяного столба на расстояниях до сотен м от скважины вследствие улучшения фильтрационных свойств водовмещающих пород при интенсивных сотрясениях.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 18-05-00337.*

---

## СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЕ И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ТРИГГЕРЫ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

*Корнилова А.А., Гайдамака С.Н., Николаев А.В.*

*nikavs1@gmail.com*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

Одним из источников естественных триггеров геодинамических процессов является активный минерагенез, происходящий при метасоматозе в зонах минерального замещения минерализованными водами и газами в проницаемых породах зон разломов, субвертикальных дайках. Образующиеся при этом минералы имеют иные физические свойства и химический состав, чем первичные, вмещающие породы. Это неизбежно сопровождается сейсмоакустикой и изменениями баланса химических элементов вследствие ядерных превращений в условиях когерентных коррелированных состояний квантовых частиц. Сейсмоакустические поля представляют собой широкополосный шум, частотная полоса оценивается по характерному размеру зерен минералов, около 1–10 мм, соответственно частоты около 0.1–1 МГц, амплитуды сигналов порядка 10–15 мм. Экспериментальные исследования *in situ* в области звуковых частот в скважинах показывают, что структура звука иерархическая, неоднородная, хорошо распознается аудио методами, т.к. сам регистрирующий прибор – человек обладает сильно различающимися индивидуальными свойствами, пока геоакустикой не исследованными. Влияние процессов, ядерного синтеза элементов на минерагенез должно быть выражено в аномалиях химического состава минералов в зонах метасоматоза и постепенного уменьшения по мере перехода к вмещающим породам. Происходящие при этом изменения в некоторых случаях могут быть обнаружены визуально. Изучение механизма этих изменений требует применения серьезного аналитического оборудования для проведения рентгенодифрактометрического, альфа-трекового и масс-спектрометрического анализов проб. Опыт лабораторных исследований показывает, что некоторые элементы, входящие в состав таких минералов как колеманит [1–2], порождают минеральные ассоциации, выявляющие присутствие ядерного синтеза элементов. При этом чтобы выявить закономерности изучаемых процессов, в определенные промежутки времени необходимо осуществлять анализ проб, как минералов, так и подземных вод на максимально широкий спектр элементов, с обязательной статистической обработкой результатов для получения достоверных сведений. Таким образом, поставлен вопрос об изучении тонкой пространственно-временной структуры геологических (в том числе геодинамических) процессов, включающих минерагенез, ядерный синтез элементов, имеющих геофизические, геохимические выражения в акустических, химических, трансмутационных полях, масштабы которых нанометры, наносекунды, нанограммы. Эти тонкие процессы, в свою очередь, погружены в медленные современные и

геологические процессы, «домино взаимодействий», «бурю триггеров», масштабы и место которых предстоит оценить.

#### Литература

1. Гаврилова Н.Д., Корнилова А.А., Лотонов А.М., Новик В.К. Диэлектрические свойства монокристаллов колеманита // Известия РАН. Неорганические материалы, 2008, 44(2). С. 340–346.
2. Kornilova A.A., Vysotskii V.I., Kuzmin R.N. Stimulation of LENR in Hydroborate Minerals Under the Action of Distant High-Frequency Thermal Waves // Proceedings of The 21st International Conference for Condensed Matter Nuclear Science. Fort Collins, CO USA, 3–8 June 2018.

---

## ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОЙ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ И НЕРОВНОСТЕЙ ДНА НА ОБРАЗОВАНИЕ СИЛЬНЫХ ОКЕАНИЧЕСКИХ ВОЛН

<sup>1</sup>Корольков А.В., <sup>2</sup>Логвинов О.В., <sup>1,2</sup>Малашин А.А., <sup>2</sup>Натяганов В.Л.

malashin\_a@mail.ru

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия

Микросейсмы (сейсмические шумы) изучаются на суще давно, однако на океаническом дне целенаправленные попытки их регистрации, анализа сигналов и специфики распространения стали предприниматься лишь в последней четверти прошлого века. О природе и причинах возникновения микросейсм, устойчивости их спектра ( $\min$  при 0.04–0.1 Гц и вблизи 10 Гц, а  $\max$  при 0.15–0.2 Гц) существует около десятка различных гипотез. Длительные микросейсмы в виде объемных и модифицированных наличием слоя воды поверхностных волн регистрируются от удаленных землетрясений (например, от Гималайского ЗТ 19.10.1991 г. с магнитудой 7+ микросейсмы устойчиво фиксировались на научно-исследовательском судне «Академик Иоффе» в Атлантическом океане вблизи Азорских островов на глубине 1600 м на протяжении более 250 секунд). Здесь же наблюдались 4 «микросейсмических шторма» неизвестной природы (ближайшие сильные циклоны были на расстоянии более 3000 км) продолжительностью до 1 часа. На глубине более 4 км возможно образование волн Стоунли с частотой около 1 Гц, которые вдоль морского дна на этих частотах распространяются на более далекие расстояния, чем волны Рэлея за счет меньшего затухания. В работе предпринята попытка решения обратной задачи: выяснить условия, когда устойчивые и продолжительные микросейсмы (например, от сильных ЗТ) могут генерировать на морской поверхности сильные и даже катастрофические волны. Исследуются течения сжимаемой жидкости, когда сжимаемость играет решающую роль, особенно в резонансных эффектах, когда частоты вибрирующей границы могут совпадать с частотами в жидкости и когда такие параметры, как скорость, давление, плотность, массовое течение жидкости значительно увеличиваются со временем. Подобные эффекты могут быть также вызваны периодическими структурами на дне. Для аналитических решений используются линеаризованные уравнения Навье–Стокса. Они позволяют получить условия по параметрам задачи для резонансных явлений. Численные решения «нелинейных» уравнений Навье–Стокса подтверждают аналитические выводы и дают дальнейшее представление о проблеме.

# СИСТЕМА КОМПЛЕКСНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ В ЗОНЕ АКТИВНОГО РАЗЛОМА ЮЖНОГО САХАЛИНА

<sup>1,2</sup>*Костылев Д.В.,<sup>1</sup>Каменев П.А.*

*predont@yandex.ru*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН), Южно-Сахалинск, Россия

<sup>2</sup>Сахалинский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (СФ ФИЦ ЕГС РАН), Южно-Сахалинск, Россия

Для проведения комплексных геофизических наблюдений в районе Центрально-Сахалинского разлома и сейсмического мониторинга Анивского газового месторождения создан экспериментальный полигон в с. Петропавловское Анивского района Сахалинской области. Произведены оценки уровня шума и выполнены сейсморазведочные работы в местах установки геофизического оборудования. Для мониторинга сейсмического процесса на полигоне установлены молекулярно-электронный и механический велосиметры. Проведен сравнительный анализ технических характеристик сейсмометров и обосновано их совместное применение. Система сейсмического мониторинга южной части Центрально-Сахалинского разлома дополнена группой выносных пунктов полигона «Петропавловское»: «Таранай» и «Корсаков». Пункты наблюдения образуют треугольник с расстояниями от 20 до 30 км друг от друга, что позволяет регистрировать локальные события в исследуемой зоне с уверенным определением их эпицентрии. Анализ регистрационных возможностей сейсмического оборудования показал, что выбор места для полигона оказался оправданным для мониторинга. Уровень шумов в пункте регистрации невысокий и в сочетании с использованием стандартных фильтров, применявшимися для идентификации событий, не затруднял определение вступлений различных типов волн. В настоящий момент получены первые результаты, подтверждающие заданные возможности установленной аппаратуры, позволяющей, совместно с сетью сейсмических станций СФ ФИЦ ЕГС РАН, регистрировать сейсмические события в районе Анивского газового месторождения с представительностью  $M \geq 1.0$ . Гидроакустическая часть системы наблюдений полигона содержит два молекулярно-электронных гидрофона с полосой пропускания 0.02–200 Гц и чувствительностью 1.5 мВ/Па. Гидрофоны установлены в обводненной скважине и в открытом мелководном водоеме. Проведен сравнительный анализ работы двух гидроакустических каналов. Получены результаты натурных гидроакустических наблюдений слабых землетрясений в районе Центрально-Сахалинского разлома. Исследовались характеристики зарегистрированных сигналов акустической эмиссии от землетрясений, воспринимаемых гидрофонными станциями (частотный спектр, времена прихода сейсмических волн). В непосредственной близости от сейсмоактивных областей Юга Сахалина была развернута сеть из трех пунктов мониторинга подпочвенного радона. Проявление сейсмической активности сопредельных сейсмогенных областей нашло отражение в динамике объемной активности радона в воздухе подпочв. После обкатки аппаратуры и установки дополнительных пунктов планируется использовать данные радонового мониторинга в качестве дополнительного параметра для обоснования заключений о возможных сценариях. Все перечисленные походы к проведению комплексного мониторинга в зоне Центрально-Сахалинского разлома должны позволить расширить возможности исследования локальной сейсмичности, а также методов среднесрочных прогнозов сильных землетрясений. Кроме решения фундаментальных вопросов развернутую сеть наблюдений

можно успешно применять и для решения прикладных задач, таких как наблюдения за процессами наведенной сейсмичности в зоне Анивского газового месторождения.

---

## **ВЛИЯНИЕ МНОГОКРАТНЫХ СЛАБЫХ УДАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЭВОЛЮЦИЮ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ГЕОМАТЕРИАЛОВ**

***Косых В.П.***

v-kosykh@yandex.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А.Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

Разработан и изготовлен лабораторный стенд для исследования влияния многократных слабых ударов на эволюцию напряженно-деформированного состояния (НДС) цилиндрических образцов геоматериалов. Реализована возможность воздействия на образец ударными нагрузками при его одновременном нагружении крутящим моментом и сжимающим усилием. Проведено исследование влияния длительных слабых ударных воздействий на НДС трубчатых образцов из эквивалентного геоматериала, нагруженных статическим сжатием. Внешний диаметр образцов составлял 38, внутренний – 15, а длина – 115 мм. Образцы готовили из смеси экорезина (акрилового гипса), кварцевого песка с размером частиц 0,3 мм и воды, взятых в соотношении 100:100:28 соответственно. Продольные деформации образцов измеряли 4–6 тензорезисторами с базой 5 мм, расположенными вдоль образующей с равным шагом. Наклейку тензорезисторов проводили kleem БФР-2К. Полимеризацию клея проводили при температуре 200 градусов С в течение 10 часов. Эксперименты продолжались непрерывно в течение 700–2000 часов. Энергия ударов составляла 0,08 Дж, а частота – 2 Гц. Установлено, что на фоне общей деформации сжатия (ползучести) образца, его участок, составляющий 1/4 общей длины и примыкающий к точке нанесения ударов, испытывает постепенное распрямление первоначально сжатых элементов. Величина сжатия остальной части образца ( $3/4$  длины) в процессе нанесения ударов увеличивается. Изменение деформации во времени происходит немонотонно, а в виде колебаний относительно тренда. Сравнение фаз волн сжатия в разных точках образца показывает, что действие слабых ударов инициирует прохождение по нему медленной волны деформации со скоростью 8 мм/час. Начальное сжимающее напряжение образца также немонотонно уменьшается. Обнаруживаются отдельные участки роста и падения напряжения. Образец периодически запасает и затем высвобождает накопленную энергию ударных импульсов в процессе всего эксперимента.

*Работа выполнена за счет средств Российской научного фонда (проект № 16-17-10121).*

**ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ  
В ДИАПАЗОНЕ 0.001–0,03 ГЦ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ  
НА ИОНОСФЕРУ МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ СТЕНДА СУРА**

**<sup>1</sup>Котик Д.С., <sup>2</sup>Рябов А.В., <sup>2</sup>Иванов В.Н., <sup>2</sup>Есин В.П., <sup>2</sup>Мяздриков Д.В.**

dmitry.kotik@nirfi.unnn.ru

<sup>1</sup>Научно-исследовательский радиофизический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>Научно производственное объединение «Тайфун» Росгидромета, Обнинск, Россия

В работе представлены результаты эксперимента по возможной реакции геомагнитного поля на модификацию ионосферы мощным радиоизлучением стенда СУРА. В экспериментах в июле 2015 г. стенд СУРА работал с мощностью 500 кВт, луч антенной решетки был направлен на 16° к югу (магнитный зенит). Для экспериментов было выбрано время с 21:30 по 23:30 МСК. Частота модуляции и поляризация излучения менялась по дням, несущая частота стенда выбиралась на 0.5–1 МГц ниже критической частоты F-слоя. Магнитометрические измерения проводились в двух пунктах, разнесенных между собой на 56 км. Первый пункт располагался в районе п. Юрино в 24 км к северу от стенда, второй пункт в районе д. Ильина Гора в 36 км к югу от стенда. Результаты регистрации вариаций геомагнитного поля в исследуемом диапазоне частот и их спектральный анализ представлены. Основная особенность – почти полная идентичность, как волновых форм вариаций геомагнитного поля, так и их спектров в обоих пунктах. В первом сеансе 05.07.15 при периоде модуляции стенда 15 сек. пульсации появились в конце сеанса и длились еще примерно 25 мин после его окончания. Частота максимума в спектре составляла 16 мГц ( $T = 62.5$  с). Во втором сеансе 09.07.15 при частоте модуляции стенда 5 мГц ( $T = 200$  с) пульсации появились в ходе сеанса примерно через 75 мин после его начала и длились до конца сеанса. Наблюдались два частотных максимума в спектре на 7.5 и 1.6 мГц ( $T = 133$  и 62.5 с). В третьем сеансе 21.07.15 при частоте модуляции стенда 2 мГц ( $T = 520$  с) пульсации появились в ходе сеанса примерно через 75 мин после его начала и длились до конца сеанса. Наблюдались также два частотных максимума в спектре на 5.5 и 1.45 мГц (периоды  $T = 181$  и 69 с). Приводится интерпретация наблюдаемого явления на базе механизма применения ионосферного КВ нагрева для возбуждения ионосферной неустойчивости с обратной связью [1,2].

*Работа поддержанна РФФИ (грант № 18-42-520035 р\_а).*

**Литература**

1. Streltsov, A., W. Lotko, and G. Milikh (2005), Simulations of ULF field aligned currents generated by HF heating of the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 110, A04216, doi:10.1029/2004JA010629.
2. Atkinson, G., Auroral arcs: Result of the interaction of a dynamic magnetosphere with the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 75, 4746, 1970.

# НАГРЕВ ИОНОСФЕРЫ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ НАЗЕМНЫХ УСТАНОВОК В ДИАПАЗОНАХ СРЕДНИХ И ДЛИННЫХ ВОЛН

**Котик Д., Рябов А., Яшинов В.**

e-mail: dmitry.kotik@nirfi.unn.ru

Научно-исследовательский Радиофизический институт Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», Нижний Новгород, Россия

Подавляющее большинство исследований ионосферной генерации низкочастотных радиоволн в ионосфере были проведены на специализированных радиостанциях, работающих в КВ диапазоне [1; 2]. Так называемые нагревные стены (такие как СУРА, EISCAT Tromsø, HAARP) обладают высоконаправленными антенными решетками, содержащими сотни диполей. В 80-х годах было проведено всего несколько экспериментов по ионосферной генерации в диапазоне средних волн с антенной решеткой из восьми диполей и в диапазоне длинных волн на вещательной радиостанции «Коминтерн» с штатной антенной (вертикальный диполь) [3, 4]. Эти эксперименты показали высокую эффективность применения СВ/ДВ радиоволн и простых антенных систем для генерации низкочастотных радиоволн в нижней ионосфере. В связи с данным обстоятельством, нами были проведены расчёты нагрева ионосферы радиоволнами в данном диапазоне. Именно данные по модификации температуры лежат в основе расчетов эффективности вторичного ионосферного источника низкочастотных радиоволн. Расчеты были выполнены для ряда частот в ДВ/СВ диапазонах в зависимости от времени суток и широты. Использовались известные международные модели ионосферы, атмосферы и геомагнитного поля. Расчеты были выполнены для вертикальной решетки, состоящей из 4-х горизонтальных диполей и для одного вертикального диполя. Было проведено сравнение результатов расчётов для этих двух антенн между собой и с антенной стенда СУРА на частоте 4.8 МГц. Было показано, что нагрев в исследуемых диапазонах с использованием мало дипольных антенн может быть сравним или даже более эффективен по сравнению с нагревом в КВ диапазоне традиционными нагревными стендами.

*Работа поддержанна РФФИ (грант № 18-42- 520035 р\_а).*

## Литература

1. *Belyaev P.P., D.S. Kotik, et al. Generation of electromagnetic signals at combination frequencies in the ionosphere, Radiophysics and Quantum Electronics* 30(2):189-206 DOI: 10.1007/BF01034491.
2. *Shtubbe, P. Review of ionospheric modification experiments at Tromsø. J. of Atm. Terr. Phys.* 1996, T. 58, P. 349–368.
3. *Belikovich V.V. et al. The «Sura» facility: Study of the atmosphere and space (a review), (2007), Radiophysics and Quantum Electronics* 50(7):497–526, DOI: 10.1007/s11141-007-0046-4.
4. *Котик Д.С., В.О. Ранопорт, С.В. Поляков, М.С. Петров, Ю.А. Сорокин. ОНЧ сигналы, генерируемые в области авроральной электроструи среднеширотным длинноволновым передатчиком. В кн.: Низкочастотное излучение в магнитосфере Земли, М. : ИЗМИРАН, 1986, с. 71–75.*

# **РАЗВИТИЕ ТРЕЩИН НА РАЗНЫХ МАСШТАБНЫХ УРОВНЯХ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ГОРНЫЕ ПОРОДЫ**

**Кочанов А.Н.**

kochanov@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия

Научные основы безопасности горных работ подразумевают изучение природы и причин формирования аварийных ситуаций, а также разработки способов и средств по предупреждению катастрофических событий, в том числе в виде горных ударов, обрушения горных пород и т.д. В этой связи проблема безопасности горных работ и проблема разрушения, неразрывно связаны. При кажущейся простоте разрушения его механизм весьма сложен и охватывает огромную область на шкале размеров, начиная от атомного масштаба, а завершается визуальными проявлениями. В рамках современных представлений разрушение материалов является неравновесным пространственно-временным процессом накопления повреждаемости, обусловленного образованием и развитием разномасштабных по размерам пор и трещин, природа которого заключается в микроскопической неоднородности материалов и их структурных особенностей. Для исследования влияние структурных особенностей горных пород на процесс разрушения проведены лабораторные исследования, в рамках которых динамическое воздействие на образцы горных пород моделировалось взрыванием микрозарядов тэн в камуфлетном режиме. С помощью современных методов физического эксперимента оптической, лазерной сканирующей конфокальной и электронной микроскопии выполнено изучение элементов структуры горных пород и ее эволюции в условиях динамического воздействия. Впервые получены изображения дефектов на разных масштабных уровнях в 3D формате и определены их параметры. В рамках эксперимента после динамического воздействия кроме микротрещин наблюдалось образование протяженных радиальных макротрещин длиной несколько сантиметров, развитие которых связывается с газовым фактором. Извилистая форма трещины на начальном этапе ее развития может свидетельствовать об изменении скорости ее распространения или, точнее, о задержке в ее развитии, что, очевидно, связано с формированием зоны локализации разрушения у ее вершины и последующим скачкообразным продвижением. Задержка в развитие магистральной трещины позволяет за это время образоваться за счет развития микродефектов, более мелких трещин в объеме образца. В мраморе, породе с однородной микроструктурой, в отличие от гранита, не наблюдалось множественного трещинообразования, трещины имели прямолинейную траекторию, были более протяженные, но немногочисленные и практически достигали границ образцов. Для оценки механических свойств и структурной неоднородности образцов применялся метод микро- и наноиндентирования, позволяющий определять модуль Юнга и твердость на различных масштабных уровнях, а также вязкость разрушения отдельных минеральных компонентов. Результаты исследований, в том числе связанных с трехмерной визуализацией макро- и микродефектов, создают предпосылки для развития теоретических моделей в области физики прочности для прогнозирования и управления процессами деформирования и разрушения горных пород, что является необходимым инструментом для максимально безопасного и эффективного освоения недр.

## **ИНИЦИРОВАНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ГОРНЫМИ РАБОТАМИ**

**Кочарян Г.Г., Будков А.М., Кишкина С.Б.**

e-mail: gevorgkidg@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер РАН, Москва, Россия

Предложена феноменологическая модель землетрясений ( $M > 3$ ), вызванных добычей полезных ископаемых. 1. Основными причинами инициирования динамического скольжения по разлому при добыче полезных ископаемых являются: – квазистатическое изменение поля напряжений в результате выемки и перемещения горной породы, – изменение эффективной жесткости вмещающего горного массива в результате проходки, – изменение гидрогеологического режима зон разломов, – накопление малых деформаций, локализованных на разрывах в зонах активных разломов. 2. Следующие геомеханические критерии должны быть выполнены для возникновения динамического скольжения по разлому: (i) Касательные напряжения на локальном участке разлома должны достигать уровня, близкого к текущему значению прочности (в большинстве случаев это выполняется для активных разломов); (ii) Материал центральной части разлома должен обладать свойствами разупрочнения с ростом скорости скольжения; (iii) Должно выполняться определенное соотношение жесткости породы и жесткости разлома. 3. Для инициирования землетрясения определенной величины необходимо изменить уровень напряжений или свойства материала в сегменте разлома, по крайней мере, в несколько раз большем, чем площадь зоны нуклеации будущего землетрясения. Если в результате горных работ НДС изменяется на относительно большой площади, то положительного изменения функции Кулона на величину порядка десятой доли МПа может оказаться достаточным для возникновения землетрясения. 4. Проходка подземных выработок может изменить эффективные упругие свойства вмещающего горного массива в окрестности активного разлома. Это означает, что довольно сильное землетрясение может иметь место даже в ранее асейсмичном регионе. 5. Добыча открытым способом в большинстве случаев не влияет ни на механические свойства массива на глубине гипоцентра, ни на жесткость разлома. Извлечение и перемещение породы при открытых горных работах в асейсмичных или слабосейсмичных регионах не могут быть причиной крупных тектонических землетрясений. В сейсмически активных регионах разработка крупных карьеров может существенно приблизить время будущего землетрясения. 6. Антропогенное влияние может, как инициировать сейсмические явления, так и снижать уровень сейсмической опасности. Величины событий, чувствительных к антропогенному воздействию, ограничены и, по экспертной оценке, лишь в исключительных случаях могут превышать величины  $M \sim 6-6,5$ .

Работа была поддержана РФФИ (гранты №№ 16-05-00694; 19-05-00378).

---

## **ОСОБЕННОСТИ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В УСЛОВИЯХ АЭРОЗОЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ТЕХНОГЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ**

**Крашенинников А.В., Локтев Д.Н., Соловьев С.П.**

pranfo@gmail.com

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

Рассмотрены многолетние наблюдения за электрическим полем в приземном

слое атмосферы в условиях мегаполиса (г. Москва). Проведен анализ суточных, сезонных и годовых вариаций напряженности электрического поля по данным Центра геофизического мониторинга Института динамики геосфер Российской академии наук (ЦГМ ИДГ РАН). Для выяснения вклада техногенных составляющих в вариации электрического поля проводился сравнительный анализ с данными, полученными в Геофизической обсерватории «Михнево». Данный пункт наблюдений был выбран в качестве опорного для сравнительных оценок, поскольку он находится на расстоянии 80 км от Москвы, а в ближайшей окрестности отсутствуют промышленные предприятия и другие техногенные источники загрязнения атмосферы. В процессе анализа наряду с данными о вариациях напряженности электрического поля были использованы данные о загрязняющих атмосферу веществах. В качестве основных показателей загрязнения воздуха были выбраны концентрации CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> и содержание пыли мелкодисперсных фракций (PM10, PM2,5). Взвешенные частицы (PM) представляют собой смесь твердых и жидкых частиц, находящихся в воздухе во взвешенном состоянии. Источниками взвешенных частиц в атмосфере являются автотранспорт (двигатели внутреннего сгорания) и продукты химических реакций, в которых участвуют газообразные загрязняющие вещества. Показано, что воздействие мегаполиса проявляется в увеличении амплитуд сигналов напряженности электрического поля, которое можно связать с отличием в концентрации аэрозольных частиц в рассматриваемых пунктах наблюдений. Анализ полученных данных позволяет оценить степень антропогенной аэрозольной загрязненности мегаполиса. В дни хорошей погоды, в 90% случаев, отмечается хорошая корреляция между напряженностью электрического поля и концентраций загрязняющих веществ. В весенне-летние месяцы, вочные часы увеличение концентраций NO<sub>2</sub> и мелкодисперсных частиц в воздухе приводит к росту напряженности электрического поля. С осени по весну роста напряженности электрического поля ночью не наблюдается, а отмечаются дневные максимумы, коррелирующие с ростом концентрации мелкодисперсных частиц в воздухе.

---

## **СОВРЕМЕННАЯ ГЕОДИНАМИКА РАЗЛОМОВ, ИНДУЦИРОВАННАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА**

**Кузьмин Ю.О.**

kuzmin@ifz.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва, Россия

Многочисленные исследования геодеформационных процессов на разрабатываемых месторождениях углеводородов и подземных хранилищ газа показали, что основными формами деформационных процессов являются оседания земной поверхности и активизация разломных зон. Основным кинематическим типом движений земной поверхности в зонах разломов оказались локальные, квазисимметричные оседания (локальные изгибы). Ширина этих аномалий меняется в интервале от 0,1 до 1 км. Амплитуды смещений земной поверхности меняются от 5 до 50 мм. Выявлены морфологические особенности аномальных деформаций земной поверхности в зонах разломов. На территории подземных хранилищ газа оседания в зонах разломов чередуются с изгибами вверх. Эти знакопеременные деформации разломных соответствуют циклическим (2 раза в год) закачками и отборами газа. В пределах месторождений нефти и газа наблюдаются периодические локальные

изгибы вниз. Геомеханический анализ показал, что локальные деформации порядка 10–50 ppm индуцируются малыми техногенными нагрузками. Аномальные деформации земной поверхности в разломных зонах, расположенных в пределах подземных хранилищ газа, организованных в водоносных пластах, обусловлены вариациями давления в пределах 0.3–1.5 МПа. Предложен механизм формирования индуцированных деформаций разломных зон на основе представлений об активизации раздвиговых флюидонасыщенных разломов. Для подтверждения этого механизма используются данные повторных гравиметрических наблюдений, которые позволяют фиксировать динамику газоводяного флюида. Представлены данные, которые демонстрируют связь аномальных деформаций с аварийными ситуациями объектов инфраструктуры и сформулированы принципы организации системы комплексного геодинамического мониторинга зон опасных разломов.

---

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ГЕОДЕФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ШЕЛЬФОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СЕВЕРНОГО КАСПИЯ

<sup>1</sup>*Кузьмин Ю.О.,<sup>1</sup> Дещеревский А.В.,<sup>1</sup> Фаттахов Е.А.,*

<sup>1</sup>*Кузьмин Д.К.,<sup>2</sup> Казаков А.А.,<sup>2</sup> Аман Д.В.*

e-mail: fea@ifz.ru

<sup>1</sup>ФГБУН Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>ООО «ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть», Астрахань, Россия

Продемонстрирован анализ результатов геодеформационного мониторинга, который проводился на добывающих платформах, расположенных на шельфовых месторождениях нефтегазовой компанией ПАО «ЛУКОЙЛ» в Северном Каспии. Установленный комплекс измерительных приборов (инклинометры, акселерометры и др.) в постоянном мониторинговом режиме позволяет оценить устойчивость платформ во времени [1]. Обработка временных рядов инклинометрических наблюдений выполнялась с помощью специализированных программных средств, разработанных в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (пакет WinABD). По своему предназначению инклинометры – это типичные наклономеры, аналогичные традиционным маятниковым [2]. Проведена оценка амплитуд приливных и сейшевых воздействий, а так же описана динамика изменения положения добывающих платформ во времени. Проведенный спектрально-временной анализ Фурье в совокупности с периодограммным анализом [3] позволил выделить ряд периодических колебаний крена и дифферента платформ. Расчеты позволили сделать вывод о том, что гравитационные приливы (как морские, так и земные) на Северном Каспии влияние на устойчивость платформы не оказывают. Помимо этого, в совокупности с обработкой инклинометрических наблюдений, было проведено математическое моделирование деформаций дна моря, обусловленное разработкой месторождений, что позволило оценить максимальные вертикальные смещения и наклоны дна моря [4].

### Литература

1. Кузьмин Ю.О., Дещеревский А.В., Фаттахов Е.А., Кузьмин Д.К., Казаков А.А., Аман Д.В. Инклинометрические наблюдения на месторождении им. Ю. Корчагина // Геофизические процессы и биосфера. 2018. Т. 53, № 3. С. 31–41.
2. Алешин И.М., Иванов С.Д., Корягин В.Н., Кузьмин Ю.О., Передерин Ф.В., Широполов И.А., Фаттахов Е.А. Оперативная публикация данных наклономеров серии НШ на основе протокола SeedLink // Сейсмические приборы. 2017. Т. 53, №3. С. 31–41. DOI: 10.21455/si2017.3-3.

3. Фаттахов Е.А. Спектрально-временной анализ светодальномерных наблюдений на Камчатском и Ашхабадском геодинамических полигонах // Вестник СГУГиТ. 2017. Т. 22, № 4. С. 5–17.
4. Жуков В.С., Кузьмин Ю.О., Пороудин Г.А. Оценка процессов проседания земной поверхности при разработке газовых месторождений (на примере Северо-Ставропольского месторождения) // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2002. № 7. С. 54–60.
- 

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛЕТА СТРУИ АІ С УЧЕТОМ КИНЕТИКИ ИОНИЗАЦИИ–РЕКОМБИНАЦИИ

*Кузьмичева М.Ю.*

*kuzmichev.konstantin@gmail.com*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институту динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

Одним из возможных методов изучения физических процессов в ионосфере и магнитосфере являются активные геофизические ракетные эксперименты (АГРЭ), в ходе которых осуществляется воздействие на среду некоторого калиброванного источника возмущения. Для интерпретации регистрируемых явлений необходимо правильно оценивать параметры используемого источника, его эволюцию и взаимодействие с фоновой средой. В эксперименте алюминиевая плазма с начальными размерами в несколько сантиметров и средней скоростью 30–40 км/с разлетается на несколько километров. Традиционные модели состояния плазмы – приближение локального термодинамического равновесия (ЛТР), корональное равновесие (КР), описывающие стационарную плазму, оказываются неподходящими для моделирования состояния плазмы с быстро меняющимися параметрами. В этом случае при рассмотрении газодинамического движения необходимо учитывать отклонение концентраций ионов как в основных, так и в возбужденных состояниях от стационарных значений. Моделирование разлета плазменной струи проводилось с помощью решения системы одномерных газодинамических уравнений, записанных в лагранжевых координатах для случая сферической симметрии. Сравнение результатов двумерных расчетов и одномерных показали, что для осевой части струи в одномерном расчете получаются значения газодинамических параметров, близкие к тем, что получены в двумерном расчете. Одновременно с газодинамическими уравнениями решалась система обычных дифференциальных уравнений для относительных заселенностей основных состояний ионов. Представлены результаты моделирования неравновесной ионизации в алюминиевой плазме струи взрывного генератора, инжектируемой в ионосферу в ходе активных геофизических экспериментов. Показано достижение состояния «закалки» степени ионизации. Результаты неравновесного моделирования и оценки, основанные на них, были использованы для исследования других стадий разлета и других сценариев инъекции, чтобы определить ионизационное состояние плазмы и концентрацию электронов в ней.

---

## ИССЛЕДОВАНИЕ КАДЖИ-САЙСКОГО УРАНОВОГО ХВОСТОХРАНИЛИЩА НА ПРЕДМЕТ СОСТОЯНИЯ ГЕО-ОПАСНОСТИ

*Кулебеков Ж.Э., Орунбаев С.Ж.*

*kulenbekov\_z@auca.kg*

Американский университет в Центральной Азии, Бишкек, Киргизия

Радиоактивные отходы и хвосты бывшего уранового рудника Каджи-Сай и

сооружение для химической обработки на северо-востоке Кыргызстана представляют серьезную экологическую проблему. Для изучения эрозии хвостохранилища были использованы панхроматические изображения высокого разрешения SPOT. Исторически сейсмичность региона представляет высокий потенциальный риск окружающей среде от радиоактивных отходов в отвалах. Вокруг Каджи-Сая периодически возникали землетрясения с магнитудой  $mb = 4,0\text{--}5,5$  и интенсивностью, эквивалентной 6–7 баллам. Северная часть исследуемой территории занята самим озером и практически асейсмична, с небольшим количеством слабых событий. Вследствие высокой сейсмической активности на горных хребтах, граничащих с озером, урановое хвостохранилище Каджи-Сай особенно подвержено прямому и косвенному воздействиям сильных землетрясений. Район характеризуется критической устойчивостью склона из-за крутого рельефа. Поэтому сильное сейсмическое сотрясение может легко дестабилизировать большие поверхностные массы почвы и вызвать многочисленные гравитационные движения масс, такие как, оползни и лавины, а также проявления эрозии поверхности.

---

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА АККУМУЛИРОВАНИЯ И ВЫСВОБОЖДЕНИЯ ЭНЕРГИИ В ГЕОСРЕДЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПРИЛИВНЫХ СИЛ

*Лавриков С.В., Ревуженко А.Ф.*

*lvk64@mail.ru*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А.Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

В рамках метода дискретных элементов проведено численное моделирование процесса аккумулирования и высвобождения накопленной упругой энергии в геосреде при слабых воздействиях, применяемых в течение длительного времени. Расчетная область представляла собой набор дискретных элементов, помещенных внутрь квадрата (плоская постановка). Частицы среды объединены в кластеры. Дискретные элементы одного кластера связаны упругими связями. В процессе деформирования такого кластера часть упругих связей растягивается, другая их часть сжимается, а за счет трения между частицами кластер в целом самозаклинивается и занимает равновесное положение. Вследствие этого кластер обладает множественностью форм равновесного состояния. Среда, составленная из подобных кластеров, обладает способностью аккумулировать упругую энергию в виде внутренних самоуравновешенных напряжений. Нагружение тела, составленного из множества кластеров, осуществлялось заданием кинематических граничных условий, моделирующих приливное деформирование. На границе расчетной области задавалось растяжение и сжатие со скоростями соответственно  $k$  и  $-k$  во взаимно ортогональных направлениях при одновременном вращении со скоростью  $w$  относительно тела указанных направлений растяжения и сжатия. Такой способ нагружения представляет собой сложное нагружение с непрерывным поворотом главных осей тензора деформаций и моделирует пробегание по телу приливной волны, амплитуда которой определяется соотношением  $k/w < 1$ . В численных экспериментах исследовалась суммарная энергия растянутых и сжатых упругих связей. Показано, что сначала имеет место период стабилизации, после чего процесс деформирования сводится к колебаниям величины суммарной упругой энергии вокруг среднего значения, которое зависит от отношения  $k/w$ . Основной интерес представляют колебания энергии в зависимости от фазы нагружения приливной

волной и числа циклов нагружения (числа полных оборотов относительно тела приливной волны). При численном моделировании есть возможность рассмотреть ситуацию, когда амплитуда приливной волны значительно больше, чем амплитуда реальной приливной волны для Земли при действии гравитационных сил со стороны Луны и/или Солнца. При больших значениях  $k/w \approx 0.5$  колебания энергии имеют четко выраженные два максимума и два минимума за один цикл деформирования. Здесь приливные деформации тела настолько велики, что внутри одного цикла вся аккумулируемая упругая энергия практически полностью высвобождается. Таким образом, система не обладает возможностью длительного накопления упругой энергии, и процесс деформирования приобретает характер, близкий к периодическому. Уменьшение величины до значений  $k/w \approx 0.01$  и менее приводит к тому, что характер колебаний становится менее детерминированным и приобретает стохастические черты. Здесь максимумы и минимумы колебаний энергии «размазываются», и энергия, накопленная внутри одного цикла, сохраняется в виде внутренних самоуравновешенных напряжений на последующих циклах деформирования. При этом становится возможной ситуация, когда аккумулирование энергии осуществляется в течение длительного промежутка времени, а ее высвобождение происходит динамически в скачкообразном режиме. На основании результатов численного моделирования можно сделать качественный вывод о том, что периодические деформации по типу приливной волны в силу длительного их воздействия способны приводить к необратимым изменениям внутренней структуры геосреды и к длительному накоплению упругой энергии. При определенных условиях высвобождение накопленной энергии может происходить в катастрофическом режиме.

*Работа выполнена в рамках проекта ФНИ: № гос. регистрации AAAA-A17-117122090002-5.*

---

## **КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА – СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

**Лапшин В.Б.**

lapshin-vb1@mail.ru

Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова, Москва, Россия

Под термином «космическая погода» понимается совокупность гелиоатмосферических явлений и процессов на Солнце, в межпланетном и околоземном космическом пространстве, магнитосфере, ионосфере и верхней атмосфере Земли, влияющих на функционирование технических средств и систем (навигации, связи, электроэнергетики, радиационной безопасности при авиаперелетах, эксплуатации трубопроводов, аэромагнитной съемки, бурения скважин и пр.) и имеющих биомедицинские последствия. Особой задачей является выявление источников опасности и контроль факторов риска, обусловленных космической погодой. Космическая погода является угрозой космонавтам, находящимся в открытом космосе, подверженным значительному облучению, превышающему порог лучевой болезни. Активные события на Солнце и в ионосфере могут приводить к помехам в распространении радиосигналов, в том числе навигационных спутников. Космическая погода оказывает влияние на дозы радиации, которые получают пилоты и пассажиры, особенно при трансполярных перелётах. Перевод спутника в безопасный режим во время активных событий на Солнце может предотвратить нарушение работы солнечных батарей и ключевых систем спутников. В периоды низкой солнечной активности интенсивность солнечных космических лучей

уменьшается, но возрастает интенсивность галактических космических лучей. Эти процессы в совокупности с геофизическими процессами на Земле, включающими изменение положения магнитных полюсов, могут привести к изменениям регионального и глобального климата. Своевременное прогнозирование космической погоды имеет большое значение для авиации и защиты целого ряда наземных технических систем, для полёта человека в космос, запусков научных и коммерческих спутников. Для прогноза используются: параметры солнечной активности, поток галактического космического излучения, который возрастает при пониженной солнечной активности; угловое расстояние между магнитным и географическим полюсами. Контроль космической погоды особенно важен для безопасности авиаперевозок и функционирования космических комплексов, организации КВ радиосвязи, спутниковой навигации, а также к негативным воздействиям потоков энергичных частиц на экипаж, пассажиров и радиоэлектронные устройства. В настоящее время в рамках ИКАО создается глобальная система обслуживания авиации данными о космической погоде на основе глобальных и региональных центров. Один из таких центров создается в России.

---

## **РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ РАЗНОУРОВНЕВЫХ ГЕОСИСТЕМ ПО ФАЗАМ СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА**

*Левина Е.А.*

*levina@crust.irk.ru*

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

В последние десятилетия интенсивно изучается вопрос о возможной связи между сейсмичностью Земли и 11-летним циклом солнечной активности [Любушин и др., 1998; Левин, 2006; Sidorenkov, 2009; Тяпкин, 2012; и др.]. Но есть сторонники мнения и об отсутствии такой связи [Чипизубов, 2018 и др.]. Нет единства и в вопросе распределения проявлений сейсмической активности по фазам солнечного цикла. По-видимому, эти разногласия вызваны различными методами расчетов и использованием данных для разных регионов и периодов времени. В данной работе показано различие в распределении сейсмической активности для всего мира, полушарий, секторов, широтных поясов и отдельных регионов по фазам 11-летнего солнечного цикла. Использован метод наложения эпох: для выяснения статистической связи двух процессов соответствующие ряды сначала сглаживаются с помощью одинакового временного окна. Затем вычисляется, на какие фазы одного процесса приходятся максимальные значения параметров другого процесса, просуммированные по длительному промежутку времени. В качестве характеристик сейсмической активности рассматривались ряды количества землетрясений и суммарной выделившейся сейсмической энергии. Для характеристики солнечной активности использовались числа Вольфа за период с 1964 по 2018 гг. Для всех рассмотренных территорий выявлены фазы солнечного цикла, на которые приходятся максимумы количества землетрясений или выделившейся сейсмической энергии. Выявленные таким способом фазы отличаются для всего мира в целом (седьмой год солнечного цикла) и отдельных полушарий. При этом результаты северного и восточного полушарий практически совпадают с общемировыми, тогда как в южном и западном полушариях максимумы сейсмической активности наступают раньше. Выявлена закономерность в распределении сейсмической активности по широтным поясам северного полушария: фазы наступления главного максимума увеличиваются с увеличением широты и эта закономерность выражается степенной функцией. В то же время для отдельных регионов результаты могут

быть неустойчивы к изменению выборки рассматриваемых событий (учитываются все землетрясения или только сильные) и отличаются от результатов для мира и отдельных полушарий. Такая пестрая картина объясняется тем, что наблюдаемое распределение сейсмической активности является результатом множества воздействий различной природы, в котором сложно выделить влияние конкретного фактора. Предполагается, что корреляция солнечной активности с сейсмической активностью Земли объясняется общей причиной, влияющей на оба этих процесса, а именно – возмущающим действием вращения Солнца вокруг барицентра солнечной системы [Авсюк, 1996]. Наблюданная асимметрия полушарий, возможно, объясняется обнаруженным в 90-е годы смещением ядра Земли от ее геометрического центра к северо-востоку [Баркин, 2009]. Несомненно, что дальнейшие исследования солнечно-земных связей должны быть направлены на выяснение физических механизмов как внешних воздействий, так и особенностей наземных откликов, и носить междисциплинарный характер [Смольков, Баркин, 2014].

---

## **МЕХАНИКА ГРАНУЛЯРНО-БЛОЧНЫХ СУБСТАНЦИЙ И МЕХАНИЗМ ДЕФОРМАЦИИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ФУНДАМЕНТА И ЧЕХЛА ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ**

**Леонов М.Г.**

[mgleonov@yandex.ru](mailto:mgleonov@yandex.ru)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геологический институт Российской академии наук, Москва, Россия

Одна из проблем структурной тектоники это объяснение механизмов объемной деформации и внутренней подвижности зернистых и кристаллических горных пород, совокупность которых образует относительно единые тела, ограниченные в геологическом пространстве. Внутренняя 3D подвижность горных масс в пределах таких объемов фиксируется изменением их внешней формы без разрыва сплошности граничной поверхности, инфраструктурой, определяющей сдвиговую кинематику, формированием специфических морфоструктур типа тел протыкания (куполов, протрузий), зон сланцеватости. Инфраструктура таких тел характеризуется дискретной гранулярно-блочной структурой, размерность которой варьирует в широких пределах от микро- до мега-уровня. К природным объектам подобного рода принадлежат некоторые магматические тела (прежде всего, граниты), массивы мраморов и кварцитов, песчаные линзы, некоторые разновидности метаморфических пород. Изменение морфоструктуры и пространственного положения таких тел сопровождается возникновением внутренней кластической структуры пород, которая приобретает облик и свойства гранулированных субстанций. Поведение дезинтегрированных пород описывается в рамках физики гранулированных сред и мезомеханики. Гранулированная среда – это совокупность соприкасающихся друг с другом дискретных твердых доменов (зерен, блоков, связных объемов), пространство между которыми заполнено менее вязкой субстанцией – флюидом, воздухом, диспергитами, тектоническими брекчиями, микрокатаклизитами и пр.) (работы И.А. Гарагаша, С.В. Гольдина, В.Н. Николаевского, А.Ф. Ревуженко, К.С. Кембелла, А. Мета, Х. Ягера, С. Нагеля и др.). Внутренняя связность монолитных доменов выше, чем связность среды в целом. Тело с гранулированной структурой становится «вязко-текучим» и приобретает способность к объемному течению в твердом состоянии. Объемная подвижность – фундаментальное свойство блочной среды (работы Г.Г. Кочаряна). В докладе рассмотрены породные комплексы чехла

и фундамента Восточно-Европейской платформы, особенности строения и механизм формирования которых находят объяснение с позиции механики гранулированных сред.

*Работа выполнена по темам Госзадания № 0135-2016-0012 и проекта № 0135-2018-0040 Программы Президиума РАН.*

---

## **ФОРМЫ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ (ГРАНУЛЯЦИИ) КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОДНЫХ КОМПЛЕКСОВ («ТЕКТОНИКА РАЗРЫХЛЕНИЯ»)**

**Леонов М.Г., Пржиялговский Е.С., Лаврушина Е.В.**

e-mail: mgleonov@yandex.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геологический институт Российской академии наук, Москва, Россия

А priori принято, что фундамент платформ и складчатых областей характеризуется крупноблоковой тектоникой и (или) складчательными деформациями большого радиуса кривизны и не подвержен существенной внутренней структурной переработке. Этот вывод касается и гранитов, которые могут составлять до 40–80% объема пород, слагающих фундамент. Исследования авторов на примере многих регионов (Балтийский щит, Гобийский Алтай, Забайкалье, Тянь-Шань) показали, что гранитные массивы фундамента древних и молодых платформ могут быть интенсивно дезинтегрированы на постмагматической стадии. Тектоническая переработка гранитов выражена в формировании специфических систем трещиноватости и разномасштабной дезинтеграции, охватывающих огромные объемы пород. Деформация осуществляется за счет незначительных смещений со сдвиговой кинематикой, рассредоточенных по множеству структурных элементов (диффузный сдвиг), но которые захватывают массив целиком. При этом внутреннее единство массива и сплошность ограничивающей поверхности остается ненарушенной. Комплекс структурно-кинематических индикаторов и изменение внешней формы гранитных тел указывают на их катакластическое течение и перемещение в пространстве. Конечным результатом является формирование тел протыкания – куполов и кристаллических прорезей. Свойственная кристаллическим породам фундамента объемная дезинтеграция и связанная с этим 3D подвижность (текучесть) пород, названа Г. Штилле «тектоникой разрыхления» (нем. Lockertektonik). Именно она является основой многих структурных преобразований в кристаллическом фундаменте платформ и складчатых поясов. Проявления и следствия тектоники разрыхления рассматриваются в рамках механики гранулированных сред и мезомеханики.

*Работа выполнена по теме гос. задания (проект № 0135-2016-0012), при финансовой поддержке Программы Президиума РАН № 47 (проект № 0135-2018-0046).*

---

## **ИССЛЕДОВАНИЕ НА МОДЕЛЬНЫХ ОБРАЗЦАХ ОСОБЕННОСТЕЙ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН ПРИ ГИДРОРАЗРЫВЕ СКВАЖИН**

**Леонтьев А.В., Рубцова Е.В.**

leon@misd.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения РАН, Новосибирск, Россия

Настоящее исследование относится к технологическим аспектам выполнения измерительного гидроразрыва, который в настоящее время все чаще применяется как метод определения напряжений в массиве горных пород. Приводятся

результаты физического моделирования процесса образования трещин при гидро-разрыве стенок измерительных скважин. Опыты выполнялись на кубических образцах из полиметакрилата с гранями  $200 \times 200$  мм. В образцах, в центре одной из граней, выполнялись сквозные либо тупиковые отверстия (скважины) диаметром 12 мм. В части образцов на заданных интервалах скважин были нарезаны продольные (по образующей, длиной до 30 мм) и поперечные (кольцевые) щели глубиной до 3 мм, которые являлись концентраторами напряжений, инициирующими начало и направление процесса развития трещин при гидро-разрыве. Тесты гидро-разрыва стенок скважины выполнялись с использованием макета зонда, представляющего собой полый стержень, на котором размещены пакеры из полиуретана, а также конструктивные элементы, обеспечивающие сжатие пакеров в осевом направлении для обеспечения герметизации выбранного участка скважины. Гидро-разрыв стенок скважины осуществлялся путем подачи под давлением рабочего флюида (глицерина) через осевой канал зонда в межракерный интервал. Тесты гидро-разрыва выполнялись в модельных образцах при различных схемах их нагружения. Для этого был использован стенд трехосного нагружения, оснащенный пятью гидродомкратами (ДН10П10, грузоподъемность 10 тс) и системой подачи и распределения рабочего давления для неравнокомпонентного нагружения граней образцов. Исследования характера проявления трещин гидро-разрыва выполнены на 12 модельных образцах. Полученный экспериментальный материал представлен в табличной форме, содержит канонический ряд сведений, отражающих характер возникновения и особенности образования трещин гидро-разрыва в ближней зоне измерительных скважин при различных напряженно-деформируемых состояниях вмещающей среды. Анализ характерных примеров развития трещин гидро-разрыва в модельных образцах показал, что продольный гидро-разрыв стенок скважины имеет, как правило, одностороннюю направленность по отношению к оси измерительной скважины, при этом наличие на поверхности скважин инициирующих щелей не всегда обеспечивает заданное направление их развития, что говорит о необходимости проведения дополнительных исследований. Результаты физического моделирования могут быть использованы при постановке и решении аналитических задач в области измерительного гидро-разрыва, а также в целях развития технологических приемов выполнения направленного измерительного гидро-разрыва в натурных условиях.

---

## **ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВОЗРАСТАНИЯ И СНИЖЕНИЯ ТРИГГЕРНОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ МАССИВА ПРИ ОТРАБОТКЕ ЛОВОЗЕРСКОГО РЕДКОМЕТАЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

**Ловчиков А.В.**

vocson@goi.kolasc.net.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ РАН) Горный институт (ГоИ КНЦ РАН), Апатиты, Россия

Ловозерское месторождение является одним из наиболее геодинамически опасных месторождений России. Здесь произошло самое сильное техногенное геодинамическое событие за всю историю шахт и рудников России (горно-тектонический удар на руднике «Умбозеро» 17.08.1999 г., магнитуда  $ML = 5.1$ , энергетический класс  $k = 11.8$ ). Установлено, что это событие вызвано одновременной выемкой двух пологопадающих сближенных рудных залежей, отрабатываемых системами с открытым выработанным пространством, в высоко тектонически

напряженном массиве. В 90-е годы прошлого века, в период эксплуатации рудника «Умбозеро», сейсмичность Ловозерского месторождения, как по количеству сильных сейсмических событий ( $ML > 1$ ), так и по их энергии превосходила сейсмичность соседнего Хибинского апатито-нефелинового месторождения, хотя объемы горных работ на Хибинском месторождении были в десятки раз больше. Этот факт свидетельствует о том, что техногенная триггерная сейсмичность вызывается, в первую очередь, природными, а не техногенными факторами. В настоящее время эксплуатацию Ловозерского месторождения осуществляют рудник «Карнасурт», отрабатывающий две маломощные (мощность по 1.2 м каждая) пологопадающие (угол падения 10–15° к горизонту) сближенные (расстояние между залежами по вертикали 90–110 м) рудные залежи в высоко текtonически напряженном породном массиве. Рудник «Умбозеро» уже 10 лет законсервирован. Сейсмичность рудника «Карнасурт» в период 2002–2015 гг. была достаточно высокой (до 10 сильных событий  $ML > 1.0$  в год). В текущий момент наблюдается снижение сейсмической активности массива рудника. В последние годы происходит не более 1–2 сильных событий ( $ML > 1.0$  в год). Количество слабых сейсмических событий ( $E = 103–104$  Дж) в массиве от года к году снижается: в 2016 году фиксировалось в среднем 26 событий в месяц, в 2017 году – 11 событий в месяц, в 2018 году – 8 событий в месяц. Ни одного сильного сейсмического события в массиве рудника в 2018 году не зарегистрировано. По нашему мнению ослабление сейсмической активности массива рудника «Карнасурт» связано с тем, что в последнее время не ведется отработка верхней сближенной залежи над отработанной частью нижней залежи. Таким образом, отсутствуют значительные междублочные подвижки массива, обусловленные горными работами.

---

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В АКТИВНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАКЕТНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

<sup>1,2,3</sup>*Лосева Т.В., <sup>1</sup>Косарев И.Б., <sup>1,2,3</sup>Ляхов А.Н., <sup>1</sup>Поклад Ю.В., <sup>1</sup>Гаврилов Б.Г.,  
<sup>1,2</sup>*Зецер Ю.И., <sup>2,3</sup>Черменин А.В.**

*losseva@idg.chph.ras.ru*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (ГУ), Долгопрудный, Россия

<sup>3</sup>Центр фундаментальных и прикладных исследований ВНИИА им. Н.Л. Духова, Москва, Россия

В конце прошлого столетия был проведен ряд активных геофизических ракетных экспериментов (АГРЭ), в которых в ионосферу Земли выбрасывалась металлическая (Al) плазма. Целью этих экспериментов являлось исследование процессов взаимодействия плазмы с геомагнитным полем, генерации ионосферных возмущений разных масштабов, определение характеристик свечения возмущенной области. Численному моделированию динамики металлических плазменных струй и динамики металлических плазменных облаков был посвящен целый ряд работ, главным результатом которых стало качественное и количественное согласие с данными наблюдений возмущений геомагнитного поля на начальной стадии движения плазмы в геомагнитном поле. Одним из методов верификации физических моделей является сравнение результатов расчетов оптических характеристик с данными оптической регистрации, выполнявшейся наземной, спутниковой и ракетной аппаратурой в диапазоне длин волн от УФ до дальнего ИК диапазонов с высоким временным и спектральным разрешением. Решение такой задачи требует

учета процессов переноса излучения и расчетов его оптических (радиационных) эффектов в точках наблюдения. На ранней стадии динамики металлической плазмы в разреженном воздухе применима радиационно-газодинамическая (РГД) модель. Численное моделирование начальной стадии динамики высокоскоростной алюминиевой струи и начальной стадии последующего разлета плотного сгустка плазмы взрыва проводилось в рамках РГД модели [1; 2] в условиях, соответствующих условиям экспериментов Флаксус (140 км) и Северная Звезда ( $\sim 300$  км). Модель учитывает РГД-процессы в веществе струи и в воздухе, распространение на большие расстояния теплового излучения, испущенного высокотемпературной плазмой. Возбуждение ионосферы под действием этого излучения оценивалось в рамках плазмохимической модели. Численное моделирование проводилось с использованием таблиц термодинамических и оптических свойств металлической плазмы, полученными в настоящих исследованиях, и известных ранее таблиц воздуха. Характеристики свечения возмущенной области рассчитывались независимым интегрированием уравнений переноса излучения вдоль совокупности большого количества лучей, проходящих в точку наблюдения через расчетную область. Получены временные зависимости газодинамических параметров плазмы и параметров свечения облака в широком диапазоне длин волн (плотности потоков излучения в различных точках наблюдения, диаграммы направленности этого излучения), а также рассчитана ионизация окружающей ионосферы под действием испущенного излучения.

*Работа выполнена в рамках Государственного задания (проект № 0146-2017-0013).*

Литература:

1. Лосева Т.В., Голубь А.П., Косарев И.Б., Ляхов А.Н., Поклад Ю.В., Гаврилов Б.Г., Зецер Ю.И., Черменин А.В. Начальная стадия развития плазменной струи в активных геофизических ракетных экспериментах // Динамические процессы в геосферах. Выпуск 9. Сборник научных трудов ИДГ РАН М. : ГЕОС, 2017. С. 102–110.
2. Лосева Т.В., Косарев И.Б., Зецер Ю.И., Ляхов А.Н., Черменин А.В. Свечение высокотемпературного алюминиевого облака на начальной стадии его разлета в ионосфере // Динамические процессы в геосферах. Выпуск 10. Сборник научных трудов ИДГ РАН М. : ГЕОС, 2018. С. 193–200.

---

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИГГЕРНОГО ЭФФЕКТА В УДАРООПАСНОМ МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

*<sup>1</sup>Луговой В.А., <sup>2</sup>Долгих Г.И., <sup>1</sup>Цой Д.И., <sup>1</sup>Гладырь А.В., <sup>1</sup>Рассказов М.И.  
denis.tsoi@mail.ru*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, Хабаровск, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия

Высокая интенсивность горных работ на рудниках ПАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение» (ПАО «ППГХО») привела к формированию обширной зоны техногенной нарушенности геосреды, что явилось одной из причин активизации геодинамических процессов в массиве горных пород, вмещающем отрабатываемые месторождения. Проявления горного давления при отработке глубоких горизонтов месторождений протекают на фоне высокой

современной геотектонической активности региона. Для комплексных исследований по изучению геодинамической и сейсмической обстановки, на месторождениях ПАО «ППГХО» силами ряда академических институтов создана и совершенствуется многоуровневая система комплексного геодинамического мониторинга, объединившая сейсмический, геоакустический и деформационный методы и измерительные комплексы в единую измерительную сеть. В рамках создания многоуровневой системы комплексного геодинамического мониторинга в районе Стрельцовского рудного поля в 2012 г. установлен 50-метровый лазерный деформограф. Он расположен в подземной горной выработке на глубине более 300 м. Оптическая часть деформографа собрана на основе модифицированного интерферометра Майкельсона неравноплечего типа с длиной рабочего плеча 50 м, ориентированного на северо-восток под углом 30°, и частотно-стабилизированного лазера фирмы MellesGriott. Интерферометр способен регистрировать смещения земной коры с точностью до 0.1 нм в частотном диапазоне от 0 до 1000 Гц. Обработка результатов измерений деформографа проводится с использованием разработанной программы «ДЕФОРМОГРАФ». Результаты измерений деформографа представляются в следующем виде: 1. Зависимостью смещения базы деформографа от времени, которая позволяет оценить длиннопериодные вариации акустического поля. 2. Спектральной характеристикой сигналов, полученной при обработке временной зависимости смещения. 3. Динамической спектрограммой, которая иллюстрирует поведение спектральных составляющих сигнала во времени. Для оценки влияния взрывных воздействий на деформационное поле в районе лазерного деформографа проведена серия опытных взрывов. Полученные результаты свидетельствуют о том, что размер зоны эффективного контроля деформографа в поперечнике составляет не менее 10 км. На 2-х недельной записи деформографа выделены суточные и полусуточные приливные колебания (величина которых составляет 23 ч 18 мин и 11 ч 53 мин соответственно). По результатам обработки данных выявлен характерный спектр диапазона собственных колебаний Земли от основного сфероидального тона  $\text{S}_2$  до другого основного сфероидального тона  $\text{S}_0$ . Согласно результатам исследований с участием лазерного деформографа, лазерного нанобарографа и многоканальной автоматизированной геоакустической системой контроля горного давления, сейсмические волны от удаленных землетрясений и взрывных работ инициируют геодинамические проявления и оказывают влияние на состояние массива горных пород, на что указывает наличие характерных резких скачков смещений во временной записи деформационного сигнала и увеличение числа событий с ростом их энергии, зарегистрированных датчиками геоакустической системы.

---

## ГЛОБАЛЬНЫЕ СВЯЗИ МЕЖДУ СОБСТВЕННЫМИ ШУМАМИ ЗЕМЛИ: ТРЕМОР ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, СЕЙСМИЧЕСКИЕ ШУМЫ, НЕРЕГУЛЯРНОСТЬ ВРАЩЕНИЯ ПЛАНЕТЫ

*Любушин А.А.*

lyubushin@yandex.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН), Москва, Россия

Под собственным шумом Земли будем понимать постоянно имеющие место вариации параметров сейсмического шума и дрожи земной поверхности, измеряемой средствами космической геодезии. Источником этих случайных флюктуаций являются воздействия на земную кору со стороны атмосферы и океана, а также внутренние процессы в земных оболочках, в том числе и предваряющие крупные

геологические катастрофы. Современные средства геофизического мониторинга дают возможность детального исследования собственного шума Земли. В настоящее время число действующих станций GPS, регистрирующих смещения земной поверхности в трех направлениях с шагом по времени 5 минут, превосходит 11 тысяч и постоянно растет. Число широкополосных сейсмических станций глобальной сети исчисляется сотнями. Это данные свободно доступны для анализа из ряда баз данных. Возникает проблема создания методов совместного анализа нескольких тысяч синхронных временных рядов и интерпретации полученных результатов. В докладе приводятся результаты анализа глобальных и региональных сейсмических шумов с использованием ряда нелинейных статистик, оцениваемых в скользящих временных окнах. Набор используемых статистик для исследования свойств сейсмического шума и дрожи земной поверхности включает в себя мульти-фрактальные и энтропийные свойства сигналов, а также значения спектральных экспонент, индексов гладкости и линейной предсказуемости. Выделены ритмы изменения ко-герентности и трендов параметров сейсмического шума с периодом около 2.5 лет, предположительно инициированные резким нарушением регулярности вращения Земли в 2003 году. Для ряда территорий, на которых существует достаточно густая сеть стационарных пунктов GPS (США, Япония, Италия), проведено детальное исследование динамики изменения во времени 2-мерной плотности вероятности распределения по пространству экстремальных значений статистик дрожи земной поверхности. Это позволило выделить ряд аномальных «пятен», в которых наиболее часто достигаются максимальные и минимальные значения различных свойств tremора, в том числе и максимума ко-герентности шума. Обсуждается связь выделенных регионов с зонами повышенной сейсмической опасности.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-05-00133).*

---

## ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ВЫСОТНЫХ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ 1962 года

**Ляхов А.Н.**

[alyakhov@idg.chph.ras.ru](mailto:alyakhov@idg.chph.ras.ru)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер РАН, Москва, Россия

В 1962 г США и СССР провели девять успешных испытаний ядерного оружия в ионосфере Земли. Для геофизики в целом и физики ионосферы в частности, данные эксперименты являлись уникальным высокозэнергичным воздействием с известными физическими параметрами. В проведенных экспериментах высота менялась от 60 до 450 км, энергетический эквивалент от  $2,8 \cdot 10^{13}$  до  $6 \cdot 10^{15}$  Дж. За прошедшие десятилетия был достигнут значительный успех в описании эффектов высотных взрывов [1; 2]. С геофизической точки зрения испытания 1962 года являлись активными экспериментами, источник возмущения ионосферы имел известные параметры и физические механизмы воздействия на верхние геосфераe должны быть нам известны. В экспериментах был обнаружен макроскопический глобальный эффект возмущения нижней ионосферы Земли и распространения радиоволн СДВ-ДВ диапазона. Этот первичный эффект наблюдался в моменты времени менее 1 секунды на расстояниях до 9000 км, в условиях, исключающих видимость точки взрыва на всех использованных высотах. В докладе представлены архивные наблюдательные данные, полученные в США на трансатлантических и транстихоокеанских трассах, и данные наблюдений в Западной Европе, включая уникальные записи одновременной трассовой регистрации в средних широтах.

Рассматриваются выдвинутые в 60-е годы теоретические модели эффекта и их несостоительность в непротиворечивом описании всего набора имеющихся экспериментальных данных.

#### Литература

1. Замышляев Б.В., Маслин Е.П., Лоборев В.М., Шилобреев Б.А. Физика ядерного взрыва. В 2 т. М. : Наука. Физматлит, 1997.
2. Knapp W.S. Handbook. DNA-3499H, 1975. AD-A010-228. 199P

## ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ ФИЛЬТРАЦИИ ФЛЮИДА В ОБРАЗЦАХ ПЕСЧАНИКА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

*Майбук З.Я., Киреенкова С.М., Пономарев А.В., Соболев Г.А.*

e-mail: avp46@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

В работе экспериментально исследовано воздействие постоянного электрического поля на фильтрацию водных растворов NaCl, KCl, лимонной кислоты и суспензии с наночастицами оксида алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) в песчанике. Исследования выполнены на цилиндрических образцах кварцполевошпатового песчаника (диаметр 30, длина 60 мм), пористость 13–15%, размер зерен 0.5–1.5 мм. Основным породообразующим минералом является кварц, сцепментированный глинистыми и железистыми минералами. Высокая пористость позволила пропускать растворы при атмосферном давлении. Образцы песчаников в термоусадочной трубке закреплялись вертикально на кронштейне. На торцах образца устанавливали платиновые электроды, конструкция которых обеспечивала смачиваемость более 90% площади торцов образца. Большинство экспериментов было выполнено при последовательном ступенчатом возрастании приложенных напряжений от источника постоянного тока в диапазоне 12 ÷ 100 В. Предварительно каждый образец насыпался раствором заданного состава, причём состояние насыщения поддерживалось в течение всего эксперимента. Далее измерялось время, за которое объем раствора 0.23 мл (5 капель) просачивался через образец при заданном напряжении. Затем напряжение снижалось до нуля, и цикл повторялся при более высоком напряжении. Каждый эксперимент состоял из 6-ти циклов. Мы использовали различные составы флюида (суспензии) с разной концентрацией входящих в него компонентов от 0.0025 до 0.02%. Основными типами флюида были дистиллированная и природная (водопроводная вода), в которую добавлялись лимонная кислота (ЛК), наноразмерные частицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  размерами от 20 до 80 нм, KCl и NaCl. Установлено, что скорость фильтрации растворов с добавками NaCl, KCl,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и лимонной кислоты с концентрацией 0.01%, в разных сочетаниях и по отдельности увеличивается при воздействии постоянного электрического тока определенной полярности, причем при перемене полярности скорость фильтрации не возрастает. Кроме того, при увеличении напряжения наблюдается значительное увеличение тока в растворах с NaCl и KCl по сравнению с раствором лимонной кислоты и оксидом алюминия. Скорость увеличения фильтрации в растворе дистиллированной воды с лимонной кислотой и оксидом алюминия была одинаковой при относительном возрастании силы тока от его начального значения. Оценка затраченной энергии для увеличения скорости фильтрации растворов при воздействии постоянным током показала, что доля этой энергии для раствора электролитов с KCl возрастает почти на порядок, а для раствора лимонной кислоты с оксидом алюминия в 6.5 раз по сравнению с водой. Неожиданным результатом оказалась

независимость скорости роста фильтрации от величины силы тока. Обсуждаются подходы для возможного объяснения наблюдаемых эффектов.

---

## **ЗОНАЛЬНАЯ ДЕЗИНТЕГРАЦИЯ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА КАК ЯВЛЕНИЕ, ПРЕДШЕСТВУЮЩЕЕ ВНЕЗАПНМУ «ОТЖИМУ» ПЛАСТА**

**Макаров В.В., Одинцев В.Н.**

Odin-VN@yandex.ru

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия

При экспериментальном исследовании массива горных пород вблизи выработок на больших глубинах часто выявляется необычная закономерность в структуре наведенной трещиноватости – зональная дезинтеграция пород, которая заключается в последовательном чередовании зон сильной и слабой (до полного отсутствия) нарушенности пород при удалении от стенки выработки (чл.-корр. РАН В.Н. Опарин и др., G.R. Adams et al., проф. В.В. Макаров и др.) Экспериментальными исследованиями также установлено (проф. Г.Я. Полевщикова и др.), что такие зоны образуются и в угольных пластах, что проявляется, в частности, в волнобразном изменении газопритока в пробуренные в пласте скважины по мере увеличения их длины. В последнее время в России и Китае предпринимаются значительные усилия для разработки теории зональной дезинтеграции массива хрупких пород, однако для газосодержащих пластов таких исследований крайне мало. В работе обсуждается модель газодинамического разрушения угольного пласта, в основе которой лежит концепция зональной дезинтеграции пласта впереди забоя очистной выработки. Рассмотрено напряженное состояние горизонтального угольного пласта, нагружаемого прочными вмещающими породами. Вблизи забоя выработки в краевой части пласта образуется область запредельного деформирования, описываемая ниспадающей ветвью зависимости «напряжение-деформация». Определено напряженное состояние пласта и вмещающих пород с учетом области запредельного деформирования, построена зависимость между протяженностью этой области и обобщенным параметром нагрузки, учитывающим длину очистной выработки и горное давление налегающих пород. Показано, что эта зависимость имеет точку возврата, которая в математической теории катастроф характеризуется как точка потери устойчивости системы. Таким образом, при достижении значения параметра нагрузки, соответствующего этой точке, квазистатический процесс деформирования пласта должен смениться динамическим процессом деформирования и частичным разрушением пласта. Это явление можно трактовать как триггерный эффект в деформировании пласта. Качественно новое равновесное состояние пласта и вмещающих пород соответствует зональной дезинтеграции, что проявляется в образовании в глубине пласта, по крайней мере, одной магистральной трещины отрыва и прилегающих к ней малых трещин, проходящих через всю толщину пласта и отделяющих от сплошного пласта его краевую часть. Проведено моделирование процесса заполнения магистральной трещины свободным метаном вследствие диффузии и фильтрации метана из пласта в трещину и построена зависимость повышения давления газа в трещине от времени при различных фильтрационных и диффузионных параметрах угля. Определено критическое значение давления газа, при котором краевая часть пласта динамически сдвигается в направлении выработки. На практике это явление получило название внезапный «отжим» пласта, за которым часто следует выброс угля и газа из внутренней части пласта. Рассмотренная модель деформирования и разрушения пласта в некоторой степени

соответствует модели «отжима» пласта проф. С.В. Кузнецова и В.А. Трофимова. Принципиальное отличие состоит в анализе первопричины разрушения пласта. Из проведенного исследования следует, что концепция зональной дезинтеграции может быть полезной для более глубокого понимания механизма макроразрушения угольного пласта и появления в выработках большого количества свободного метана.

---

## **ФОРМИРОВАНИЕ КАЙНОЗОЙСКОГО РЕЛЬЕФА В СКЛАДЧАТЫХ ОБЛАСТЯХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ И ЮГО-ВОСТОЧНОЙ АЗИИ.**

### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

*Макаров П.В., Еремин М.О., Перышкин А.Ю.*

eremin@ispms.tsc.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского Отделения Российской Академии Наук, Томск, Россия

Изучение условий формирования кайнозойского рельефа в складчатых областях Центральной и Юго-Восточной Азии является актуальной задачей, решаемой на основе геологических, геофизических, геодезических, тектонофизических и др. методов. Математическое моделирование позволяет дополнить существующие инструментальные наблюдения и выполнить проверку различных физических гипотез о строении, физико-механических свойствах блоков, а также условий нагружения, приводящих к конкретным тектоническим течениям и распространению импульсов от коллизий на активных окраинах тектонических плит. В работе построены структурная и физическая модели, описывающие передачу и распространение деформации от области Индо-Евразийской коллизии вглубь континента на дальние расстояния. За основу взяты схемы, предложенные в работах [1; 2]. Основной нерешенной проблемой структурной модели по глубине является то, что она, построенная по известным данным о размерах и плотностях структурных элементов, не отвечает в полной мере принципу изостазии в силу грубости этих данных, что и выявляют расчеты. В физической модели нагружаемой геосреды учтены внутреннее трение, дилатансия и зависимость прочности от глубины. Так как оценки всех параметров модели, учитывающие перечисленные выше факторы, очень приблизительные, то получаемая картина эволюции границы Мохо, изменение рельефа дневной поверхности, а также формирующихся полос локализованного сдвига и разломов, в том числе вблизи границ жестких структур, на настоящем этапе значительно отличаются от наблюдений. Все эти параметры также оказывают заметное влияние на установление изостатического состояния – деформации структурных элементов стремятся обеспечить необходимую изостазию. Предыдущие расчеты тектонических течений, выполненные в 2D постановке, отвечающей бесконечно тонкой деформируемой сферической оболочке земной поверхности, а также расчеты на настоящем этапе выполнения проекта при учете воздействия со стороны Аравии, показали, что основные деформации сосредоточены в области Гималаев, вблизи индентора, хотя направления тектонических течений в областях Центральной и Юго-Восточной Азии хорошо согласуются с наблюдениями. Такая картина наблюдается в связи с тем, что в такой постановке оказывается неучтенным один из главнейших факторов передачи деформации – сила тяжести. Из проведенных серий расчетов можно сделать следующий вывод: рассмотрение тектонических течений в Центральной и Юго-Восточной Азии, обеспечивающих передачу импульса от удаленной коллизии вглубь континента, в постановке плоской деформации, по-видимому, являются слишком грубыми приближениями, как

для случая расчета тонкой оболочки земной коры, так и профиля по глубине вдоль сейсмоплотностного разреза. Необходимо решение полноценной трехмерной задачи, где наличие дополнительной степени свободы, позволит принять во внимание главнейшие факторы: силу тяжести, боковое растекание, структуру, воздействие плюмов, что должно максимально приблизить модель к реальности.

*Работа выполнена при поддержке интеграционного проекта СО РАН «Динамика и механизмы изменения рельефа в кайнозое, активная тектоника и сейсмичность горных областей южной Сибири: термохронологическое, сеймотомографическое и физико-математическое моделирование»*

Литература:

1. Семинский К.Ж. Иерархия зонно-блоковой структуры литосферы Центральной и Восточной Азии // Геология и геофизика. 2008. № 10. С. 1018–1030.
2. Суворов В.Д., Стефанов Ю.П., Павлов Е.В., Мельник Е.А., Татаурова А.А., Кочнев В.А. Геомеханические условия роста Тянь-Шаня и Алтая // Доклады академии наук. 2017. Т. 476, № 5. С. 562–566.

---

## МЕДЛЕННЫЕ ВОЛНЫ ДЕФОРМАЦИИ КАК ТРИГГЕРЫ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ РАЗРУШЕНИЙ. ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ

*Макаров П.В., Перышкин А.Ю.*

alexb700@yandex.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия

Практические и социально значимые проблемы катастрофических разрушений элементов земной коры, включая проблемы прогноза землетрясений, а также прогноза опасных динамических явлений в горных массивах с выработками, связаны с решением фундаментальных задач по установлению механизмов формирования очага разрушения, установлению механизмов эффективного переноса энергии в нагружаемой среде, а также с решением проблемы миграции деформационной активности и сейсмическими активизациями, которые в совокупности образуют комплексную научную проблему развития деформационного процесса, завершающегося катастрофическим разрушением. Возможным общим фактором, объединяющим наблюдаемые деформационные явления, можно считать медленные волны деформации. Высказана гипотеза, что медленные деформационные возмущения могут распространяться как солитоны, а значит, способны наиболее эффективно переносить и перераспределять энергию в нагружаемой упругопластической среде. Медленные деформационные волны в земной коре непосредственно не регистрируются. Их существование устанавливается косвенно по регистрации вариаций геофизических полей, в частности, по направленным миграциям землетрясений. Привлечение к описанию деформационных волновых возмущений, например, уравнений теплопроводности (диффузии) или уравнений sin-Гордонавслучаеихпредставлениякаксолитонов, базируется только на априорной уверенности, что подобные волновые возмущения существуют и являются солитонами. Эти уравнения никак не связаны с эволюцией напряженно-деформированного состояния, а значит, их решения могут характеризовать только возможную качественную картину медленных деформационных возмущений. Разработана математическая модель генерации и распространения медленных деформационных волн неупругой природы. Показано, что медленные волны деформаций являются

автосолитонами и эффективно переносят энергию в формирующийся очаг разрушения. Эти медленные автоволновые возмущения могут быть триггерами катастрофических разрушений, в частности землетрясений. Также в работе показано, что медленные автоволновые деформационные возмущения влияют на вид НДС, приводя к миграции деформационной активности.

---

## МОНИТОРИНГ ТЕХНОГЕННОГО ОПОЛЗНЯ

<sup>1</sup>*Малышков С.Ю.,* <sup>1</sup>*Гордеев В.Ф.,* <sup>1</sup>*Поливач В.И.,* <sup>2</sup>*Шталин С.Г.*

msergey@imces.ru

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук (ИМКЭС СО РАН), Томск, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», Томск, Россия

Профильтными исследованиями методом естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ) в 2010 году по трассе магистрального газопровода в условиях горно-складчатых областей с активной геодинамикой Северо-Кавказского региона выявлено 20 оползнеопасных участков. Применяемые радиоволновые методы основаны на явлении электромагнитной эмиссии – способности диэлектрических материалов излучать электромагнитные сигналы при воздействии на них. Электромагнитная эмиссия возникает в процессе образования и релаксации зарядов на плоскостях трещин при изменении напряженного состояния массива горных пород. Они возникают как при изменении сплошности материалов-диэлектриков (горных пород), так и при разрыве, заполненных электролитом капилляров. Наблюдения за процессом электромагнитного излучения позволяет контролировать напряженно-деформированное состояние горного массива. Все оползни, развитые вдоль трассы газопровода, по механизму смещения, подразделяются на вязкопластические и оползни сдвига, с доминированием последних. Но в качестве наиболее опасного был выделен оползень на 53.5 км газопровода. Несмотря на то, что в ноябре 2010 г. на этом участке еще не было крупных отколовшихся блоков, а только наметились трещины закола протяженностью около 10 м и величиной раскрытия 2–10 см. На этом пикете участок с чрезвычайно высокими значениями электромагнитных полей, интерпретированный, как зона растяжения, сменяется резко отрицательной аномалией, связанной с напряжениями сжатия. Такая мозаичная структура поля говорит о сложном объемно–напряженном состоянии горных пород и возможной активизации оползня на этом участке газопровода. В месте резкой смены знака поля очень высокая вероятность схода оползня. При строительстве газопровода был подрезан крутой ( $30^\circ$  и более) склон, к тому же дешифрирование космических снимков показало здесь наличие зоны пересечения двух геологических разломов, что могло спровоцировать развитие техногенного оползня. Данный оползень представлял прямую угрозу газопроводу и требовал незамедлительного принятия управляющих решений, направленных на защиту промышленного объекта. В настоящее время на этом участке проводится периодический контроль динамики изменения напряженно-деформированного состояния горных пород методом ЕИЭМПЗ. В докладе приведены результаты инструментального и геоморфологического наблюдений за развитием техногенного оползня. За 8 лет наблюдений произошло существенное изменение рельефа и увеличение размера тела оползня. Места откалывания новых блоков и просадки грунта

хорошо прогнозируются. Данные инструментального контроля согласуются с результатами геоморфологического анализа.

---

## ДЕМПФИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОСЕЙСМИЧЕСКОГО РАЗРЫВА

*Мартынов В., Будков А., Остапчук А.*

*vasili.martynov@phystech.edu*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

Избыточные напряжения, накопленные в земной коре, снимаются, как правило, в ходе межблокового проскальзывания вдоль существующих разломов и крупных трещин. Могут быть реализованы как медленные моды – события медленного скольжения и низкочастотные землетрясения, так и быстрая мода – обычные землетрясения. Инженерная деятельность часто приводит к интенсификации сейсмичности или её возникновению в ранее асейсмических областях, например, при разработке месторождений углеводородов, ведении горных работ. Небольшая глубина залегания гипоцентров таких событий может привести к достаточно крупным экономическим потерям. Однако высокая изученность массива горных пород при разработке месторождений полезных ископаемых дает возможность обоснованного выбора разломных зон, потенциально опасных с точки зрения возникновения крупных тектонических землетрясений. В настоящее время установлено, что косейсмический разрыв начинается в зоне разлома, характеризующейся свойством скоростного разупрочнения, в то же время участки торможения и остановки характеризуются свойством скоростного упрочнения. Целью настоящей работы является установление оптимальных параметров воздействия на очаговую зону, направленного на максимальное снижение энергии динамического разрыва. В настоящей работе в численных экспериментах исследовали закономерности деформирования 1D слайдер-модели. Модель представляет систему блоков, упруго связанных друг с другом. Каждый блок движется под действием упругих сил, действующих со стороны соседних блоков и драйвера, и сил трения, действующих вдоль интерфейса модельного разлома. В наших расчетах мы рассматривали систему из 25 блоков. В ходе экспериментов нами было смоделировано внешнее воздействие в виде изменения фрикционных свойств интерфейса у определенных блоков. В ходе «воздействия» изменялась как площадь изменения фрикционных свойств, так и выраженность свойства скоростного упрочнения. Проведенные эксперименты показали, что, как правило, энергия динамического разрыва снижается с увеличением площади изменения фрикционных свойств. Однако существуют отдельные конфигурации «воздействия», при которых энергия динамического разрыва не только сохраняется, но может и увеличиться. Это показывает необходимость очень скрупулезного определения конфигурации эффективного воздействия при минимизации затрат на его проведение.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-35-00587).*

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТРИГГЕРНЫХ ФАКТОРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПРИРОДЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ ТОРНАДО**

**<sup>1</sup>Маслов С.А., <sup>2</sup>Натяганов В.Л.**

[sergm90@mail.ru](mailto:sergm90@mail.ru)

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Москва, Россия

На основе системы уравнений электрогидродинамики показана важная роль дипольной или трипольной электрической структуры грозовых облаков в формировании соответственно струйных низовых прорывов (downburst) или воронок торнадо с учетом сильных возмущений атмосферного электрического поля (АЭП) под грозовыми облаками. Фактически, в этих случаях возмущения АЭП играют роль триггерных механизмов для начала реализации гидродинамической неустойчивости типа Рэлея–Тейлора. В процессе перезарядки дипольного облака в трипольное часто определяющую роль на начальной стадии формирования воронки торнадо играет эффект гигантской проницаемости (ЭГДП) суспензии облачных капель с тонким двойным электрическим слоем на их поверхности. К электромагнитным факторам триггерного характера также относятся сильные парамагнитные свойства кислорода и диамагнетизм азота, что способствует сбору молекул кислорода к оси вращения торнадо-циклиона и выталкиванию из центральной зоны азота. С учетом наличия в облаках и атмосферном воздухе гидратированных кластерных ионов и небольшой разницы в атомных весах молекул кислорода и азота, подобная сепарация основных составляющих атмосферного воздуха также способствует реализации неустойчивости Рэлея–Тейлора именно в центральной зоне вращающегося грозового облака, т.е. началу образования воронки торнадо. Сравнительный анализ влияния на генерацию воронки торнадо или низового прорыва различных триггерных факторов электромагнитной природы показывает, что основными являются величина и топологический вид возмущений АЭП, а также ЭГДП при перезарядке грозового облака из дипольного в трипольное, тогда как другие факторы обычно играют вспомогательную роль.

---

## **БЕСКОНТАКТНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СЛАБЫХ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ (ЭП) В СТАЦИОНАРНЫХ И ДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

**Махмудов Х.Ф.**

[h.machmoudov@mail.ioffe.ru](mailto:h.machmoudov@mail.ioffe.ru)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

Усовершенствованный и созданный электрометр (ЭМ), во-первых, позволяет, получить новую информацию о физических свойствах материала (стекла и др. твердых тел) [1; 2] и их проявлении в поле механических сил. Во-вторых, прикладное значение таких исследований также представляется важным при разработке новых неразрушающих методов контроля за дефектами структуры материала и способов устранения этих дефектов [3]. Также с появлением химических волокнистых материалов и со все возрастающим применением пластмасс в технике и быту процессы электростатической зарядки и связанные с ними технологические проблемы и опасности приобретают все большее значение. Разделение зарядов

возникает, например, при протекании изоляционной жидкости по трубам при заполнении баков самолетов и пластмассовых бензиновых канистр, разбрызгивании аэрозолей и т.д. Предпосылкой для борьбы с электростатическими зарядами и для разработки способов их устранения являются измерительные приборы и методы воспроизведения измеряемых величин, отображающие эффективность принятых мер. Так же как и при измерениях частичных разрядов, использование сложных и дорогих приборов еще не дает гарантии правильных результатов измерений. На основании рассмотренных ЭМ, описанных в работах [3–7] была усовершенствована и разработана новая схема ЭМ. Отличительной особенностью данной схемы является применение на входе дифференциального каскада, состоящего из двух симметричных полевых транзисторов T1 и T2 с изолированным затвором. Следует отметить, что, благодаря разработанной нами схеме входной цепи ЭМ, была уменьшена входная емкость усилителя, и, соответственно, увеличена его чувствительность. Она на два порядка выше, чем у ЭМ [3] и на порядок, чем у ЭМ [7]. Использование усовершенствованной и созданной ЭМ способен бесконтактно сканировать и измерять распределение потенциала ЭП поверхности диэлектриков без искажения формы сигналов в условиях соблюдения постоянства зазора между зондом и образцом [8; 9].

#### Литература

1. Махмудов Х.Ф. // Деформация и разрушение материалов. 2012. № 8. 41–45.
2. Махмудов Х.Ф. // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 1. С. 76–86.
3. Миржамалов К.М. // Электризация стекол и ее влияние на прочность : Дисс. канд. физ.–мат. наук. Л. 1991. – 181 с.
4. Килькеев Р.Ш., Куксенко В.С. // Электрические эффекты и зарождение трещин в щелочено – галоидных кристаллах // ФТТ. 1980. Т. 23. № 10. С. 3133–3138.
5. Проектирование измерительных приборов. Пер. с англ. Под ред., Р.Р. Красовского. Л. : Энергия, 1967, – 370 с.
6. Балбачан М.Я. // Исследование механоэлектрических свойств горных пород: Дисс.. канд. физ.–мат. наук. М. 1988. – 182 с.
7. Lockner D.A., Byerly J.D., Kukstnko V.S., Ponomarev A.V. // PAGEOPH, 1986. V. 124, n. 3. P. 601–608.
8. Махмудов Х.Ф., Куксенко В.С. // ФТТ. 2005. Т. 47. Вып. 5. С. 856–859.
9. Махмудов Х.Ф. Автореферат дисс. кандидата физико-математических наук. Санкт-Петербург, 1997.

---

## ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНОГО МАССИВА И БЕТОННОЙ ОБДЕЛКИ В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ

<sup>1</sup>Махмудов Х.Ф., <sup>2</sup>Савельев В.Н.

e-mail: h.machmoudov@mail.ioffe.ru

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>ООО «Прадиком», Санкт-Петербург, Россия

Работа посвящена экспериментальному изучению распространения акустического сигнала (АС) в горных породах и бетонном слое с заданными структурными и механическими характеристиками. Измеряется скорость распространения АС по первому вступлению сигнала на приемный пьезодатчик, а также спектр сигнала в широком диапазоне частот. Измеренное значение скорости АС для горной породы и бетонного слоя хорошо согласуются с расчетными, на основе известных формул теории упругости (во втором случае с учетом геометрии слоя).

Также методом фотоупругости измерялись напряжения в акустической волне, по которым оценивалась механическая энергия волны. Проведен анализ энергетического баланса в процессе «источник АС» – «передающая среда» – «приемник АС» с применением аппарата спектрального анализа. В лабораторных исследованиях источником излучения волны служило упругое соударение стального шара (источник АС) с поверхностью образца. Для исключения неупругих процессов в момент соударения использовалась металлическая закладка. Определен также спектральный состав энергии волны. Полученные результаты могут быть использованы в разработке методов определения параметров источника АС (в частности, его энергию и местоположение), а также структуру передающей среды. Тем самым, информативность метода акустоэмиссии будет значительно повышена. Для корректной интерпретации результатов регистрации сигналов упругих волн из горного массива в системе A-Line DDM необходимо изучение акустических свойств горного массива и бетонной обделки. С этой целью был разработан, изготовлен и калиброван для измерения напряжений упругой волны пленочный пьезоприемник с линейной амплитудно-частотной характеристикой в диапазоне до 20 кГц. Измерения упругих волн проводились путем регистрации отклика бетонной обделки и горного массива на ударное воздействие. Ударное воздействие производилось стальным шаром массой 4.68 кг непосредственно по бетонной обделке, через стальную плиту, прикрепленную к бетонной обделке, а также по закладной, вделанной в бетонную стену. Проведенные измерения скорости распространения упругой волны от удара шаром в слое бетона дали величину 3920 м/с. Оценка скорости волны в бетоне, произведенная с помощью расчета модуля упругости для плоской волны, составила величину 4343 м/с. Измерения скорости упругих волн в массиве горных пород дали величину 5318 м/с. Было проведено измерение спектрального состава отклика массива горных пород на возбуждение его ударом шара, а также оценена энергия в упругой волне, формируемой ударом шара (0,3 Дж). Спектральная плотность возбуждения массива от удара шаром концентрируется в диапазоне 0.7–3.2 кГц.

---

## РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО (АЭ) МОНИТОРИНГА ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ И ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НЕКОТОРЫХ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ ФГУП «ГОРНО-ХИМИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ» («ГХК») – ПРЕДПРИЯТИЯ ГОСУДАРСТВЕННОЙ КОРПОРАЦИИ «РОСАТОМ»

<sup>1</sup>*Махмудов Х.Ф.,<sup>2</sup>Савельев В.Н.,<sup>3</sup>Медведев В.Н.*

e-mail: h.machmoudov@mail.ioffe.ru

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>ООО «Прадиком», Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Государственная корпорация «Росатом» Федеральное Государственное унитарное предприятие «Горно-химический комбинат» («ФГУП ГХК»), Железногорск, Красноярского края, Россия

В настоящее время в породных массивах ФГУП «ГХК» (Горно Химического Комбината) не наблюдается динамических проявлений горного давления, последствия которых фиксировались бы в горных выработках. Этому способствует как прочность пород, так и сплошная мощная бетонная обделка. Но нет гарантий, что в дальнейшем, в процессе эволюции подземного пространства: увеличения выработанного объема и усложнения его геометрии, увеличения площади свободных

поверхностей (поверхностей выработок), возрастания влияния тектонических нарушений и увеличения локальных значений полей напряжений, они не возникнут. Обоснованным и дальновидным является выявление и контроль низкоэнергетического разрушения горных пород, которое при определенных условиях может привести к мощным ( $E > 103$  Дж) динамическим явлениям. Исходя из изложенного, сформулированы цель и задачи, на решение которых направлена предлагаемая методика. Целью методики является обеспечение безопасной эксплуатации подземных сооружений путем проведения акустико-эмиссионного (АЭ) мониторинга, позволяющего проводить прогнозирование места, времени и энергии, выделяющейся в упругом импульсе при образовании дефекта в горной породе. Разработка методики АЭ мониторинга включает в себя: – обоснование частотного диапазона АЭ мониторинга; – обоснование выбора аппаратуры для регистрации акустических сигналов (АС); – разработку специальных датчиков акустической эмиссии (ДАЭ) для использования в скважинах диаметром 76 мм; – разработанный способ раскрепления ДАЭ в скважинах диаметром 76 мм; – методику регистрации АС; – методику обработки и анализа данных АЭ мониторинга, полученных как действующей в горной выработке системой контроля, так и вновь разработанной; – критерии оценки состояния объектов контроля. В данном разработке учтены связанные между собой факторы, которые необходимо учитывать как на стадии проектирования системы контроля (СК), так и на стадии ее эксплуатации. На основе вариационного анализа контролируется влияние техногенных факторов на состояние горного массива: объемы и интенсивность ведения горных работ, предупредительные меры по уменьшению опорного давления и т.п. Специфичным является необходимость создания и использования БД, содержащей формализованные параметры техногенных факторов. При этом необходимо отметить, что по геологическому строению, физико-механическим свойствам горных пород, тектоническим нарушениям, способам отработки месторождений и т.п. практически каждое горнорудное предприятие является уникальным. Проблемы, связанные с ударопасностью, специфичны, что ставит новые и модифицирует уже известные задачи контроля состояния горного массива.

---

## **ОНЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ, ВОЗБУЖДАЕМЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ГЕНЕРАТОРОМ, УСТАНОВЛЕННЫМ НА БОРТУ СПУТНИКА «ИНТЕРКОСМОС – 24»**

**Михайлов Ю.М.**

e-mail: yumikh@izmiran.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкина Российской Академии наук, Москва, Троицк, Россия

Представлены результаты исследования ОНЧ-сигналов в ионосфере, возбуждаемых электрическим генератором ПВП, установленным на спутнике «Интеркосмос-24». Основой ПВП являлся генератор электрических импульсов длительностью 250 мс со скважностью 4. Этот генератор работал циклами длительностью 20 с. В пределах каждого цикла несущая частота импульсов изменялась каждую секунду от 1.5 до 19.5 кГц с шагом  $Df = 1$  кГц. Амплитуда импульсов в четырёх последовательных циклах равнялась 50, 100, 150, 200 В. Излучающая антенна генератора представляла собой два луча длиной по 7.5 м и была расположена на расстоянии 7 м от приёмной антенны широкополосного волнового комплекса. Возбуждаемые ОНЧ-сигналы были зарегистрированы 05.01.90 на витке 1238 в

17:00 МСК на  $L = 2,3$  и  $h = 920$  км в момент прохождения импульсами ПВП частот от 8 до 19.5 кГц. Каждому импульсу ПВП соответствовал эхо-сигнал с частотой, падающей от 4.5 до 1 кГц, запаздывающий относительно импульса ПВП на 1.2 с. Производная частоты от времени при  $df/dt$  равнялась 5 кГц/с при  $f = 4$  кГц. В ряде случаев эхо-сигнал был свистового типа, и определен как «искусственный свист». Обсуждается возможная интерпретация этих эффектов, основанная на нелинейных механизмах. К ним относятся биения двух гармонических составляющих, распространяющихся свистовым модом при нелинейных фазовых взаимодействиях, возникновение нелинейного тока при сложении волн разной интенсивности и частоты, пространственные изменения вектора  $k$  при резком изменении частоты сигнала.

---

## **ВОЗМУЩЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, ИНИЦИИРУЕМЫЕ ПРИ РАБОТЕ СТЕНДА «СУРА», НА РАССТОЯНИИ СВЫШЕ 500 км ОТ ИСТОЧНИКА**

**Михайлов Ю.М., Гайдук В.И., Капустина О.В.**

yumikh@izmiran.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкина Российской Академии наук, Москва, Троицк, Россия

Представлены результаты мониторинга земного магнитного поля на сети станций INTER-MAGNET при работе стендов «Сура» в период кампаний 2011 года (16–19.06) и 2012 года (8–18.06). На записи X и Y компонент поля с шагом по времени 1 мин обнаружены особенности в поведении поля, которые, по нашему мнению, не обусловлены естественным изменением магнитного поля. Эти особенности имеют осциллограммы с периодом порядка нескольких часов или минут. На происхождение этих сигналов от локального источника указывает распределение эффекта в пространстве. Сигналы, наблюдаемые 14.06.2012, группируются в диапазоне от -40 до 70° N и от -15 до 90° E, примерно вдоль силовой линии магнитного поля, вне этой зоны они значительно слабее или, возможно, вовсе отсутствуют. Ранее на возможность воздействия работы стендов «Сура» на магнитное поле на ближних расстояниях указывалось в работах Котика и др., а на расстояниях до 500 км в работе Ружина и др. В нашей работе было исследовано подобие наблюдаемого эффекта с результатом локального воздействия пучка ионов на магнитное поле на высоте 500 км, которое было зарегистрировано в эксперименте АПЕКС. В этом космическом эксперименте подобное явление связывают с триггерным эффектом при быстром изменении фазы сигнала. Быстрое изменение фазы приводит к изменению производной волнового вектора, а это означает изменение амплитуды волны в пространстве, иными словами изменение вида осциллограмм.

# АВТОМАТИЗАЦИЯ СГМ МЕТОДА РЕКОНСТРУКЦИИ НЕОТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ Л.А. СИМ НА ПРИМЕРЕ ЛЕНО-ОЛЕНЁКСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ

<sup>1</sup>*Молчанов А.Б.*, <sup>2</sup>*Гордеев Н.А.*

alexeybm2009@gmail.com

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

*Введение.* Создание программного пакета основано на идее автоматизации и модернизации структурно-геоморфологического метода реконструкции сдвиговых тектонических напряжений Л.А. Сим (СГМ) [5]. В методе используются статистические данные о неотектонических напряжениях, которые восстанавливаются по взаимоотношению [1] множественных линеаментов, лежащих в горизонтальной плоскости – мегатрещин. *Описание программного пакета.* Программный пакет реализован на языке программирования Python для целевой платформы Windows с разрядностью 32 и 64 бита. Основой решения задачи автоматизации СГМ метода Л.А. Сим является анализ линеаментов на космо-снимках рельефа, топо-картах и пр. Предлагаемый способ автоматизации СГМ метода Л.А. Сим производит анализ и классификацию разломов по конкретным областям карт, принимая во внимание линеаменты определённых типов. Данный способ состоит из трёх этапов: на первом этапе производится дешифрование необходимых линеаментов, на втором – поиск и измерение углов между соприкасающимися линеаментами, на третьем – классификация по М.В. Гзовскому [1; 2]. Выделение линеаментов может быть выполнено как вручную (путём нанесения векторных фигур на участок спутникового снимка или наложения готовой схемы), так и автоматически при помощи алгоритма скелетизации карты высот. В автоматическом режиме к скелетизированному изображению применяется процедура поиска т.н. особых точек, соответствующих окончаниям или пересечениям линеаментов. Далее по найденным точкам строится векторная маска линеаментов. На следующем этапе производится измерение углов между линеаментами, находящимися внутри окна с изменяемыми размерами с центром на линии разлома, и касательной к линии разлома, проходящей через центр окна. На третьем этапе осуществляется классификация путём подсчёта вероятностей принадлежности к тому или иному типу. В центрах окон с максимальными вероятностями строятся оси растяжения и сжатия в соответствии с определённым типом. Для тестирования был выбран регион Лено-Оленёкского междуречья. Территория тестирования приурочена к северо-востоку Сибирской платформы [3; 4]. *Обсуждение и выводы.* В целом проведённое тестирование следует считать успешным, поскольку большая часть исследуемых разломов была правильно классифицирована. Основным обстоятельством, негативно влияющим на результат работы программы в автоматическом режиме, является то, что на этапе дешифрования линеаментов существующий алгоритм не различает отрывы и мегатрещины. Поэтому первоочередной целью является разработка строгих критериев, позволяющих отделить отрывы от мегатрещин, оперируя данными компьютерного зрения. Тем не менее, ещё раз подчеркнём, что даже с учётом этой проблемы программа предоставляет приемлемые результаты при работе в автоматическом режиме. Таким образом, к настоящему моменту было создано и успешно протестировано программное средство, позволяющее автоматизировать СГМ метод Л.А. Сим

и значительно ускорить работы по определению неотектонических напряжений этим методом.

Литература:

1. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М. : Наука. 1975. – 375 с.
2. Гзовский М.В. Тектонические поля напряжений // Изв. АН СССР, серия геофиз. 1954. № 5. С. 390–410.
3. Гордеев Н.А. Тектонофизический анализ линеаментов Оленекского поднятия // Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы докладов всероссийской конференции – в 2-х томах. Т. 1. М.: ИФЗ. 2016. С. 48–52.
4. Гордеев Н.А., Сим Л.А. Комплексный подход изучения новейшей геодинамики, основанный на геологических и тектонофизических методах // Воздействие внешних полей на сейсмический режим и мониторинг их проявлений: Тез.докл. Междунар. Юбилейной науч. Конф., г. Бишкек, 3–7 июля 2018 г. С. 169–173.

---

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ ПРИ ЛАБОРАТОРНОМ ПРЕРЫВИСТОМ СКОЛЬЖЕНИИ РАЗЛОМА

**Морозова К.Г., Остапчук А.А., Павлов Д.В.**

[morozovaxg@gmail.com](mailto:morozovaxg@gmail.com)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

Большое влияние на динамику деформирования разлома оказывает гетерогенность фрикционных свойств центральной зоны разлома. Участки разлома, на которых стартует косейсмический разрыв, характеризуются скоростным разупрочнением, в то время как участки остановки разрыва – скоростным упрочнением. В значительной степени фрикционное поведение определяется структурой центральной зоны разлома. И если упорядоченность структуры центральной зоны и динамика её изменения может быть оценена методами корреляционного анализа сейсмических записей, то гетерогенность компонентного состава в настоящее время никак не выявляется. В настоящей работе на основе лабораторных экспериментов рассматриваются акустические проявления сдвигового деформирования разлома с мелкодисперсным многокомпонентным заполнителем и исследуется влияние структуры центральной части модельного разлома на параметры акустической эмиссии. Эксперименты были проведены в постановке слайдер-модели, в которой гранитный блок под действием нормального и сдвигового усилий скользит в режиме стик-слипа. В ходе работы рассматривались вариации параметров законов Омори и Гутенберга-Рихтера. Для всех экспериментов активность на предсейсмической стадии подчиняется закону Омори, а на стадии форшока – обратному закону Омори, причем для всех типов динамических событий  $pb < p$ , где  $pb$  – показатель степени обратного закона Омори,  $p$  – показатель степени закона Омори. В ходе экспериментов изменение доли кварцевого песка в заполнителе кварцевый песок/стеклянные шарики сопровождалось монотонным изменением  $p$  с  $1.00 \pm 0.02$  (кварцевый песок) до  $2.00 \pm 0.10$  (стеклянные шарики). Аналогичные монотонные изменения были установлены для  $b$ -value закона Гутенберга-Рихтера, который изменялся с  $0.55 \pm 0.01$  до  $1.1 \pm 0.1$ . Полученные результаты показывают, что в условиях локации импульсов представленный анализ акустической эмиссии может быть использован для определения пространственной гетерогенности структуры интерфейса.

# МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВЛИЯНИЯ ЭКЗОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ЛИТОСФЕРЫ

**Мягков Д.С.**

e-mail: dsm@ifz.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

В данной работе изучается степень и структура влияния экзогенных (эрозии и аккумуляции) факторов на формирующуюся под влиянием тектонических процессов напряжённое состояние континентальной литосферы. Исследование ведётся методами математического (аналитического, полуаналитического и численного) моделирования. Экзогенные процессы вводятся как «изолированно», так и в условиях протекания активного эндогенного геодинамического процесса. Во втором случае рассматривается континентальная литосфера области формирования эпиплатформенных орогенов, в качестве эндогенного процесса, формирующего напряжённо-деформированное состояние (НДС) совместно с экзогенными, рассматривается вынужденная конвекция в литосфере, инициированная термогравитационной конвекцией в астеносфере, рассматривающийся в качестве возможного геодинамического процесса, ответственного за формирование эпиплатформенных орогенов Центральной Азии (более подробно в [1]). На базе данной модели вводятся, в свою очередь, две модели учёта экзогенных процессов, условно названные денудационным и эрозионным. Первая традиционно используется в геомеханике и связана с амплитудами рельефа земной коры, вторая – с формой рельефа. В силу отсутствия на текущий момент единого представления о конкретном способе учёта эрозии и аккумуляции геоматериала в математических геодинамических моделях, рассматривается вопрос о возможном пути выработки такого подхода. Показаны принципиальные различия как структуры НДС, так и уровня напряжений, формирующихся в представленных моделях. Также в работе представлены численные модели формирования аномального напряжённого состояния, связанного с проистеканием экзогенных процессов вне связи с активным эндогенным геодинамическим процессом. Для этого используются упруго-пластические модели (подобные представленным в [2]). Рассматривается механизм формирования аномальных напряжений, связанных с денудацией вещества Земной коры, находящегося изначально в закритическом состоянии [3; 4]. Основываясь на данном механизме, вводятся три модели, различающиеся локализацией областей денудации: в первой – денудации подвергаются обширные участки платформ, во второй – денудация локализована в склоновой области, в третьей – в области русла крупной реки. Показана структура формирующихся дополнительный напряжений (преимущественно – горизонтального сжатия) в моделях при различных амплитудах денудации.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-35-00482.*

## Литература

1. Мягков Д.С., Ребецкий Ю.Л. Эволюция структуры течения и рельефа эпиплатформенных орогенов под воздействием мелкомасштабной астеносферной конвекции // Вестник КРАУНЦ. 2016. № 1. С. 257–290.
2. Ребецкий Ю.Л., Погорелов В.В., Мягков Д.С., Ермаков В.А. О генезисе напряжений в коре островной дуги по результатам численного моделирования // Вестник КРАУНЦ. 2018. № 3. С. 54–73.
3. Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Козырев А.А. О возможном механизме генерации избыточного горизонтального сжатия рудных узлов Кольского полуострова (Хибины, Ловозеро, Ковдор) // Геология рудных месторождений. 2017. Т. 59. № 4. С. 263–280.

4. Ребецкий Ю.Л. О возможном механизме генерации в земной коре горизонтальных сжимающих напряжений // ДАН. 2008. Т. 423. № 4. С. 538–542.

## ИЗУЧЕНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЯПОНСКОЙ ЗОНЫ СУБДУКЦИИ ДО И ПОСЛЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ТОХОКУ МЕТОДОМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Мягков Д.С., Погорелов В.В.

dsm@ifz.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

В данной работе представлены результаты численного моделирования формирования напряжённо-деформированного состояния Японской зоны субдукции региона Тохоку (Северное Хонсю) как на стадии непосредственно до катастрофического землетрясения Тохоку 2011 г., так и после (современного состояния). Целью работы является определение геодинамического процесса, ответственного за формирование полученного по сейсмологическим данным напряжённого состояния рассматриваемого региона на вышеуказанных стадиях. Именно, согласно результатам тектонофизических реконструкций [1], до события Тохоку как в континентальной литосфере Японского микроконтинента, так и в океанической литосфере Тихоокеанской плиты к Западу от тальвега жёлоба наблюдалась преимущественно обстановка горизонтального сжатия, тогда как к Востоку от тальвега жёлоба наблюдалась, напротив, обстановка горизонтального растяжения. После землетрясения Тохоку произошла перестройка напряжённого состояния на восточной окраине континентальной плиты и близ жёлоба в рассматриваемом регионе также стало наблюдаться преимущественно обстановка латерального растяжения. Описанные пространственные и временные закономерности структуры напряженного состояния требуют геодинамического объяснения, которое в рамках текущего исследования искалось путём численного решения прямой задачи геодинамики. В рамках данного исследования была, основываясь на данных сейсморазведки [2], создана математическая двумерная модель Японской зоны субдукции региона Северное Хонсю, захватывающая очаг землетрясения Тохоку (представлена в [3]). Для моделирования применялась конечно-разностная схема, разработанная Уилкинсоном [4] и модифицированная Ю.П. Стефановым. В качестве источника, ответственного за формирование напряжённо-деформированного состояния региона, рассматривались: 1) мелкомасштабная термогравитационная астеносферная конвекция, 2) давление со стороны Тихоокеанской плиты, 3) действие тангенциальных массовых сил. При моделировании состояния после события, в модели непосредственно задавалась ослабленная зона, посредством чего моделировалось само событие. Отдельно исследовался вопрос о характере влияния экзогенных процессов на формирующееся напряжённое состояние региона. Результаты моделирования показали наибольшее соответствие природным данным модели с астеносферной конвекцией и действующим тангенциальным массовым силам.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-05-01115.

### Литература

1. Ребецкий Ю.Л., Полец А.Ю. Напряженное состояние литосферы Японии перед катастрофическим землетрясением Тохоку 11.03.2011 // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5, Вып. 2. С. 469–506, dx.doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0137.
2. Nakamura Y., Kodaira S., Cook B.J., Jeppson T., Kasaya T., Yamamoto Y., Hashimoto Y.,

*Yamaguchi M., Obana K., Fujie G.* Seismic imaging and velocity structure around the JFAST drill site in the Japan Trench: low Vp, high Vp/Vs in the transparent frontal prism // Earth, Planets and Space. 2014. V. 66. C. 121–132

3. Ребецкий Ю.Л., Погорелов В.В., Мягков Д.С., Ермаков В.А. О генезисе напряжений в коре островной дуги по результатам численного моделирования // Вестник КРАУНЦ. 2018. № 3. С. 54–73.

4. Wilkins M.L. Computer Simulation of Fracture // Lawrence Livermore Laboratory, Rept. UCRL-75246. 1972.

---

## ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКИХ ОСАДКОВ ПО ВАРИАЦИЯМ УРОВНЯ ФОНА ИОНИЗИРУЮЩЕЙ РАДИАЦИИ

<sup>1,2</sup>Нагорский П.М., <sup>3,4</sup>Беляева И.В., <sup>3</sup>Яковлева В.С., <sup>1</sup>Смирнов С.В.,

<sup>1,2</sup>Пустовалов К.Н., <sup>5</sup>Яковлев Г.А., <sup>3</sup>Зелинский А.С.

e-mail: nprm\_st@mail.ru

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск, Россия

<sup>2</sup>Томский государственный университет, г. Томск, Россия

<sup>3</sup>Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

<sup>4</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия

<sup>5</sup>МБОУ лицей при Томском политехническом университете, г. Томск, Россия

**Введение.** Одним из основных составляющих радиационного фона атмосферы являются почвенные радиоактивные газы и атмосферные радионуклиды, которые служат отличными трассерами различных атмосферных и геофизических процессов. Мониторинг радиационного фона приземного слоя атмосферы показал, что его величина не является постоянной и зависит от различных факторов, например, таких, как состояние атмосферы, время суток, сезон года и географическое положение региона. Аномальное увеличение радиационного фона наблюдается при выпадении жидких осадков. Это явление объясняется процессами вымывания короткоживущих ДПР радона и торона из атмосферы. Соответственно, чем больше интенсивность дождевых осадков, тем больше возрастает мощность дозы. Цель настоящей работы – оценка интенсивности атмосферных осадков с помощью радиационных маркеров, в качестве которых использована величина аномального всплеска мощности дозы  $\gamma$ -излучения и плотности потока  $\beta$ -излучения во время осадков. В ходе исследования были проанализированы зависимости мощности дозы  $\gamma$ -излучения и плотности потока  $\beta$ -излучения от метеорологических параметров, таких как высота дождевых облаков, плотность и турбулентность атмосферы. При моделировании учитывались пространственная (в вертикальном направлении) и временная динамика мощности дозы  $\gamma$ -излучения, формируемая короткоживущими дочерними продуктами распада радона и торона в приземной атмосфере, вымываемыми на поверхность земли во время выпадения дождевых осадков. При расчете пространственного распределения (в вертикальном направлении) объемной активности короткоживущих дочерних продуктов распада радона и торона учитывалось состояние атмосферы. В результате оценки вкладов отдельных атмосферных радионуклидов в суммарную мощность дозы при различных коэффициентах турбулентной диффузии и высоты нижней кромки дождевых облаков, были определены радионуклиды, вносящие основной вклад в суммарный  $\gamma$ -фон. По измеренной мощности дозы  $\gamma$ -излучения и плотности потока  $\beta$ -излучения, была произведена проверка рассчитанных значений и динамики интенсивности дождевых осадков с экспериментальными данными. **Заключение.**

Хорошая сходимость расчетных и экспериментальных результатов свидетельствует о возможности использования параметров мощности дозы  $\gamma$ -излучения и плотности потока  $\beta$ -излучения для оценки интенсивности атмосферных осадков.

---

## ТРАНСФОРМАЦИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В АНТРОПОГЕННОЙ ГЕОСФЕРЕ

<sup>1,2</sup>*Нагорский П.М., <sup>1</sup>Дюкарев Е.А., <sup>3</sup>Яковлева В.С., <sup>1,2</sup>Пустовалов К.Н.,*

<sup>1</sup>*Смирнов С.В., <sup>4</sup>Яковлев Г.А., <sup>5,6</sup>Зенченко Т.А., <sup>1</sup>Ланская О.Г.*

e-mail: npm\_st@yandex.ru

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск, Россия

<sup>2</sup>Томский государственный университет, г. Томск, Россия

<sup>3</sup>Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

<sup>4</sup>МБОУ лицей при Томском политехническом университете, г. Томск, Россия

<sup>5</sup>Институт теоретической и экспериментальной биологии РАН, г. Пущино, Россия

<sup>6</sup>Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

Антропогенный (техногенный) ландшафт становится одной из важных составляющих окружающей среды и фактически превратился в одну из геосфер. Также, как и другим геосферам, этой геосфере свойственно искажать существующие в ней геофизические поля. Известно, что аппаратура, регистрирующая состояние и динамику систем организма человека, и аппаратура, регистрирующая вариации геофизических величин, как правило, не только разнесены по пространству, но и функционируют в разных геофизических условиях (разных геосферах). Указанные обстоятельства могут явиться и являются источниками ложных выводов, обусловленных изменением уровня и состава вариаций геофизических полей под воздействием техногенных и биологических факторов. Впервые, на примере оценки концентрации легких ионов и электрического состояния атмосферы внутри помещения, масштабные исследования влияния антропогенной геосферы на вариации геофизических полей были проведены А.Л. Чижевским. Однако до настоящего времени остается неясным, насколько геофизические поля в техногенной среде сами оказываются искажёнными под воздействием как техногенных, так и биологических факторов. В докладе представлено описание методики проведения и обсуждаются результаты параллельного мониторинга внутри и вне помещения для оценки влияния здания и присутствия (отсутствия) человека в нем на изменение уровня и состава вариаций следующих геофизических величин и полей: – напряженность электрического поля и полярные электропроводности; основные метеовеличины (температура, влажность, давление, компоненты скорости ветра); параметры турбулентности; концентрации паров воды и углекислого газа;  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -компоненты ионизирующего излучения. На основании анализа временных и спектральных характеристик вариативных составляющих геофизических величин, зарегистрированных вне и внутри помещения в различные сезоны года, сделано заключение, что измеряемые геофизические величины можно условно разделить на три основные группы. 1 группа – внутри здания не изменяется спектрально-временная картина вариаций (СВКВ), к этой группе следует отнести вариации магнитного поля и атмосферного давления. 2 группа – наличие здания частично изменяет СВКВ, в эту группу входят постоянное магнитное поле (в железобетонных зданиях изменяется его напряженность и направление), вариации  $\gamma$ -фона. 3 группа – внутри помещения и (или) в присутствии человека в нем СВКВ радикально трансформируется, к этой группе относятся вариации: температуры, влажности

воздуха, турбулентных и ветровых характеристик, концентраций Н<sub>2</sub>O и СО<sub>2</sub>, напряженности электрического поля, количества легких ионов, электропроводности, уровней а- и β- фона.

---

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ АТМОСФЕРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ВО ВРЕМЯ ПРОХОЖДЕНИЯ ШКВАЛА

<sup>1,2</sup>*Нагорский П.М., <sup>1</sup>Корольков В.А., <sup>1,2</sup>Пустовалов К.Н.,*

<sup>1</sup>*Смирнов С.В., <sup>1,2</sup>Терминов А.Е.*

e-mail: nprm\_st@mail.ru

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск, Россия

<sup>2</sup>Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Целью работы являлся анализ атмосферных условий, обусловивших возникновение шквала в осенний сезон года, а также детальная оценка динамических процессов в приземном слое атмосферы, которая привела к возникновению и развитию этого опасного природного явления (ОЯ). Ослабление западного переноса в Северном полушарии, наблюдаемое в начале XXI в. [1], способствует учащению «прорывов» воздушных масс с севера или юга, с которыми связаны большие градиенты температуры, катализирующие конвективные процессы. С 28 по 29 октября 2018 г. над г. Томском зарегистрированы шквалистые усиления ветра до 25 м/с и более. При регистрации использованы данные многопунктовых измерений метеорологических, электрических и турбулентных величин в приземном слое. Измерительная сеть оснащена автоматическими метеостанциями ТАА-01, а также датчиками напряжённости электрического поля ЕFS-2/50. Температура воздуха в период, предшествующий ОЯ, достигла аномально высоких значений. Относительная влажность опустилась до аномального низкого значения ~ 20%. В динамике компонент ветра, турбулентных потоков и напряженности электрического поля Е зарегистрированы волны с периодом ~ 12 ч. Перед прохождением холодного фронта наблюдались медленные вариации напряженности, характерные для кучево-дождевых облаков [2]. Рассмотрены условия образования ОЯ «Шквал», зарегистрированного поздней осенью в г. Томске. Отмечены специфические особенности динамики атмосферно-электрических величин перед и во время ОЯ. Полученные результаты могут быть использованы для прогноза осенних шквалов, повторяемость которых в Сибири и Арктике в условиях изменяющегося климата возрастает.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, ФЦП ИР (соглашение № 14.607.21.0205 уникальный идентификатор ПНИ RFMEFI60718X0205).

### Литература

1. Логинов С.В., Морару Е.И., Харюткина Е.В. Связь ячеек тропосферной циркуляции с изменчивостью меридиональных потоков тепла над территорией Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 08. С. 640–646.
2. Pustovalov K.N., Nagorskiy P.M. Response in the surface atmospheric electric field to the passage of isolated air mass cumulonimbus clouds // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2018. V. 172. P. 33–39.

## **ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА УРОВЕНЬ $\beta$ -, $\gamma$ -ФОНА И ЕГО ВАРИАЦИЙ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ**

<sup>1,2</sup>**Нагорский П.М., <sup>3</sup>Яковлева В.С., <sup>1,2</sup>Пустовалов К.Н.,**

<sup>1</sup>**Смирнов С.В., <sup>4</sup>Яковлев Г.А., <sup>3</sup>Зелинский А.С., <sup>5</sup>Беляева И.В.**

e-mail: npm\_st@ mail.ru

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск, Россия

<sup>2</sup>Томский государственный университет, г. Томск, Россия

<sup>3</sup>Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

<sup>4</sup>МБОУ лицей при Томском политехническом университете, г. Томск, Россия

<sup>5</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия

**Введение.** Индикаторные свойства радионуклидов и ионизирующих излучений известны и активно используются для получения новых знаний о динамических процессах, происходящих в атмосфере и литосфере, а также в целях прогноза опасных явлений природного и техногенного характера. Целью работы являлось исследование динамики полей  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучений в приземном слое атмосферы во время установления, роста и схода снежного покрова. Согласованный мониторинг ТПУ-ИМКЭС СО РАН метеорологических, актинометрических, атмосферно-электрических величин, радиоактивности и ионизирующих излучений ведется с конца 2008 г. Его технология постоянно совершенствуется. На настоящий момент мониторинг приземной атмосферы включает синхронные непрерывные автоматизированные с высокой частотой дискретизации измерения характеристик метеорологических полей и полей  $\alpha$ -,  $\beta$ -, и  $\gamma$ -излучений на серии высот и глубин. В годовом цикле вариации  $\beta$ - и  $\gamma$ -радиоактивности имеют слабовыраженный максимум в летнее время. Для  $\beta$ - и  $\gamma$ -фона переход к зимнему сезону сопровождается синхронным снижением уровней фона на всех высотах. Между высотой снежного покрова, давлением и уровнем атмосферного  $\beta$ -,  $\gamma$ -фона существуют явные зависимости. Увеличение высоты снежного покрова приводит к образованию «провала» в годовом ходе  $\beta$ - и  $\gamma$ -фона. Глубина провала определяется высотой снежного покрова. В периоды стабилизации высоты снежного покрова дисперсия уровней  $\beta$ -,  $\gamma$ -фона значительно возрастает. Сравнение вариаций уровней  $\beta$ -,  $\gamma$ -фона и нейтронной компоненты космических лучей с изменением высоты снежного покрова показало, что на нейтронную компоненту, в отличие от  $\beta$ -,  $\gamma$ -фона, этот фактор влияет слабо. Для  $\beta$ -,  $\gamma$ -фона изменение атмосферного давления оказывает влияние только в случае малых высот снежного покрова. Для нейтронной компоненты изменение атмосферного давления приводит к согласованному изменению её уровня. Это связано с тем, что оптическая толщина атмосферы для первичного космического излучения много больше единицы. **Заключение.** Проведено исследование динамики полей  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучений в приземном слое атмосферы. Установлены зависимости характеристик полей  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучений от высоты снежного покрова и вариаций атмосферного давления.

---

## **ГИСТЕРЕЗИСНАЯ МОДЕЛЬ НАКОПЛЕНИЯ И РАЗРЯДКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ**

<sup>1,2</sup>**Надежка Л.И., <sup>1,2</sup>Семенов А.Е., <sup>1,2</sup>Сафонич И.Н.**

nadezhka@geophys.vsu.ru

<sup>1</sup>Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

<sup>2</sup>ФИЦ «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Обнинск, Россия

Разработка залежей полезных ископаемых связана с производством горных работ, которые на современном уровне развития инженерных технологий

оказывают значимое влияние на окружающее пространство. Для предотвращения негативных последствий этого влияния необходимо на модельном уровне учитывать эффекты поглощения и накапливания энергии деформаций горных пород. Один из возможных подходов к решению означенной проблемы связан с использованием конструктивных гистерезисных моделей, позволяющих, после идентификации их параметров, идентифицировать энергетические состояния поверхности слоя Земной коры, что, в свою очередь, позволит оценить риски сейсмических событий, связанных с техногенными землетрясениями. Предлагаемая модель базируется на операторной трактовке гистерезисных преобразователей. С их помощью на количественном уровне устанавливаются взаимосвязи между динамическими параметрами, описывающими состояние геологической среды. Используемый преобразователь является статическим (свойства не меняются во времени), детерминированным (состояние в каждый момент определяется значениями выхода-входа), управляемым. Статичность преобразователя применительно к задачам сейсмологии означает корректное определение реакции геологической среды на ступенчатое воздействие, формируемое функцией Хевисайда. Математическая модель на базе преобразователя Ишлинского, являющегося континуальным аналогом семейства упоров с различными пределами текучести соединенных параллельно. Преобразователь Ишлинского описывает связь между напряжением и деформацией в геологических средах. Отметим, что, петля гистерезиса этого преобразования обходится по часовой стрелке (отрицательный спин) – т.е. при её обходе энергия высвобождается. Предлагаемая модель, по мнению авторов, вполне адекватно описывает достаточно сложные сейсмические процессы накапливания и разгрузки энергии в верхней части Земной коры.

---

## **НАПРЯЖЕНИЯ И ПРОНИЦАЕМОСТЬ ГЕОМАТЕРИАЛОВ И ГОРНЫХ ПОРОД: ТЕОРИЯ И ЛАБОРАТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ**

**Назаров Л.А., Назарова Л.А., Голиков Н.А.**

*mining1957@mail.ru*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

Разработан и в лабораторных условиях апробирован метод определения зависимости реологических свойств нефтеносных пород с высоким содержанием органического вещества от температуры  $T$  на основе решения обратных задач по данным термобарических испытаний. Цилиндрический образец подвергался статическому осевому нагружению и ступенчатому нагреву от 20 до 150° С, измерялось изменение высоты  $H(t)$  ( $t$  – время). Деформирование образца описывалось моделью Кельвина, в рамках которой на каждой стадии нагрева  $T = T_n$  решалась обратная коэффициентная задача определения модуля Юнга  $E_n$  и эффективной вязкости  $V_n$  пород по  $H(t)$ . Множества  $\{E_n\}$  и  $\{V_n\}$  аппроксимированы двухпараметрическими экспоненциальными функциями, получены эмпирические зависимости  $E = E(T)$  и  $V = V(T)$ . Сконструирована и изготовлена лабораторная установка для исследования зависимости проницаемости К гранулированных геоматериалов от напряжений и давления флюида. Измерительная ячейка в форме параллелепипеда заполнялась калиброванным песком с известным гранулометрическим составом, на различных участках верхней грани прикладывалось вертикальное напряжение  $S$ . На одной вертикальной грани создавалось постоянное давление газа  $P$ , на противоположной регистрировался расход  $Q(S,P)$  при стационарном режиме

фильтрации. Разработана математическая модель эксперимента, описывающая процесс массопереноса. Предполагая, что зависит от эффективного напряжения по экспоненциальному закону с коэффициентом  $A$  в показателе, найдено аналитическое решение задачи о стационарной фильтрации в ячейке при неоднородном напряженном состоянии. Предложен метод количественной оценки  $A$  на основе минимизации функционала относительной невязки между  $Q$  и теоретически рассчитанным расходом. Показано, что значение  $A$  определяется независимо от вязкости газа и начальной проницаемости упаковки геоматериала. С использованием разработанной пороупругой модели, описывающей эволюцию геомеханических и гидродинамических полей в прискважинной зоне, проведен сравнительный анализ расходных характеристик скважины для типичных значений деформационных и фильтрационно-емкостных параметров продуктивных пластов. Показано, что неучет установленных эмпирических зависимостей проницаемости от эффективных напряжений и температуры может привести к существенному завышению прогнозных оценок объема добычи.

---

## АСТРОНОМИЧЕСКАЯ ОБУСЛОВЛЕННОСТЬ НЕОРДИНАРНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ И КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАЛЛЕЛИ ПЛАНЕТЫ

*Натяганов В.Л., Скобеникова Ю.Д., Федоров В.М.*

lasik28@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Москва, Россия

Случаи неординарных проявлений тектонической активности Земли в виде неожиданных, но сильных землетрясений (типа Аляскинских в 1912 и 2002 гг. или Чилийского в 1960 г.) и мощных извержений вулканов (по типу Безымянного в 1956 г. и в кальдере Академии Наук в 1996 г. на Камчатке) часто бывают близки по пространству к основным критическим параллелям планеты ( $0^\circ, \pm 20^\circ, \pm 35^\circ, \pm 48^\circ, \pm 62^\circ$ ), а по времени – к особым астрономическим конфигурациям в Солнечной системе. С начала XX века таких особых конфигураций было по шесть с Венерой (1908, 1912, 1916, 1920 и 1956 гг.) и Юпитером (1913, 1919, 1960, 1969, 1996 и 2002 гг.), а вблизи некоторых из этих лет ( $\pm$  полгода) случались и Великие противостояния с Марсом (1909, 1924, 1956 и 2003 гг.), когда он почти в 6–7 раз оказывался ближе к Земле. Для всех этих лет характерны неординарные проявления тектонической активности; а, если к особым астрономическим конфигурациям отнести периоды резких изменений угловой скорости вращения Земли и рекордные серии скачков солнечной активности в виде мощных вспышек и корональных выбросов массы, то с начала XX века исключений из этого правила пространственно-временного перекрестия практически не будет, включая Большое трещинное Толбачинское извержение 1975 г. и мега-землетрясения Суматра – 2004 г. и Япония – 2011 г. Если к проявлениям тектонической активности относить крупные аварии со взрывами газа на рудниках и шахтах, а к особым астрономическим конфигурациям добавить ново- и полнолуния, то подобное пространственно-временное перекрестье для этих природно-техногенных катастроф явно проявляется статистически, особенно вблизи критической параллели в  $48^\circ$ , вдоль которой сейсмическая и вулканская активности проявляются относительно слабо. Если для повышения безопасности на шахтах уже можно сформулировать некоторые выводы, то в последнее время появилась надежда на совершенствование методов краткосрочного прогноза

землетрясений в результате мультисенсорного наземно-космического мониторинга и системного анализа целого комплекса взаимообусловленных литосферно-атмосферно-ионосферных признаков на основе геофизических закономерностей эмпирической схемы краткосрочного прогноза.

---

## ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАЗЛОМНЫХ ЗОН ГОРНОГО АЛТАЯ

**Неведрова Н.Н., Бабушкин С.М., Шапаренко И.О.**

e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

Для исследования были выбраны сложно-построенные участки с присутствием разломных зон на территории крупных впадин Горного Алтая. Разломы могут являться сейсмогенерирующими, а их детальные характеристики важны для целого ряда геологических дисциплин, геодинамических и прогнозных задач. Определение строения, а также местоположения зоны разломного нарушения, перекрытого рыхлыми осадками, вызывает определенные трудности. В этом случае необходимо привлечение нескольких электромагнитных методов. Методика измерений с целью построения геоэлектрических разломных моделей предполагает использование двух методов разной глубинности: ЗС, электротомография или ВЭЗ, электротомография (ЭТ) в зависимости от мощности осадочной толщи. Вначале разлом выделяется по данным ВЭЗ, ЗС, а метод ЭТ привлекается для подтверждения продолжения разлома, выделенного на первом этапе, в верхнюю часть разреза. Полевые электроразведочные работы были выполнены на трёх участках с присутствием разломов в Чуйской и Курайской впадинах. Сложностью использования комплекса методов (ВЭЗ, ЗС, электротомография) является получение разномасштабных моделей. Поэтому в ходе интерпретации рассматриваются последовательно вначале глубинная, а затем приповерхностная модель, и методика интерпретации полевых данных каждого из методов несколько отличается. Но подход является общим, сначала используются более простые 1-2D программные средства моделирования и инверсии, а затем для верификации и уточнения моделей привлекаются трехмерные программы. Детальные модели приповерхностной части разломных структур по данным ЭТ заверяются с помощью модуля численного трёхмерного моделирования на графических процессорах. Алгоритм программы сводится к моделированию распределения электрического потенциала точечного источника в произвольной трёхмерной среде. Трёхмерное моделирование дает возможность учесть влияние особенностей строения неоднородной верхней части разреза на измеренный сигнал, таких как контрастные по удельному сопротивлению блоки разного размера, а также уточнить положение имеющихся субвертикальных и наклонных границ. По результатам интерпретации были определены геоэлектрические характеристики ряда разломных структур. В целом разломные зоны выделяются понижением удельного электрического сопротивления (УЭС) относительно вмещающих отложений, на которое влияет целый ряд факторов, таких как литологический состав горных пород, присутствие многолетней мерзлоты, сейсмический режим территории и прочее. Можно отметить, что для каждого конкретного участка имеются характерные диапазоны УЭС, размеры разломного нарушения, наклоны сместителя, которые могут существенно различаться. По данным мониторинга наиболее низкие значения УЭС получены для активных структур, а на участках присутствием криогенных пород сопротивление практически на порядок выше.

В настоящее время на территории впадин выявлен целый ряд разломов различного ранга, построены их глубинные и приповерхностные модели, выявлены изменения геоэлектрических характеристик с течением времени, напрямую зависящие от сейсмической активности региона.

---

## **РАЗЛОМНО-БЛОКОВОЕ СТРОЕНИЕ МЕЖГОРНЫХ ВПАДИН ГОРНОГО АЛТАЯ ПО ДАННЫМ ГЕОЭЛЕКТРИКИ**

*Неведрова Н.Н., Санчaa А.М.*

e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

Методы геоэлектрики с контролируемым источником успешно используются для изучения глубинного строения впадин в разных горных областях. Наиболее крупные межгорные впадины Горного Алтая – Чуйская, Курайская и Уймонская относятся к кайнозойским структурам и имеют сходную историю неотектонического развития. Как известно, этот регион относится к сейсмоактивным. В связи с изучением последствий Чуйского землетрясения 2003 г. с  $M = 7.3$  ИНГГ СО РАН в 2004 году был начат новый этап работ методами электроразведки вначале в Чуйской и Курайской впадинах, а затем и в Уймонской. В комплекс измерений были включены разноглубинные методы постоянного и переменного тока. Кроме базовых глубинных методов, таких как вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ), зондирования становлением электромагнитного поля (ЗС), использована электротомография для детального исследования верхней части разреза до глубин 50–100 м. В ходе интерпретации данных были привлечены архивные электроразведочные материалы ЗС и ВЭЗ 60–80 гг. прошлого столетия по Чуйской и Курайской впадинам. В Уймонской впадине геофизические измерения были выполнены впервые. В настоящее время эта впадина асейсмична, но множественные следы древних землетрясений указывают на её высокий сейсмический потенциал. Результаты исследований показывают, что все Алтайские впадины имеют блоковое строение. На основе интерпретации электромагнитных данных, геологической, сейсмологической информации выделены предполагаемые разломные зоны. На геоэлектрических разрезах они характеризуются пониженными значениями удельного электрического сопротивления, резким изменением мощности осадочных отложений. Выделенные разрывные нарушения верифицированы трехмерным численным моделированием с использованием программ, разработанных в ИНГГ СО РАН. По комплексным данным построены блоковые геоэлектрические модели осадочной толщи и верхней части фундамента впадин, определено местоположение разломов, перекрытых кайнозойскими осадками. Полученные новые сведения о строении впадин важны для анализа результатов регулярных электромагнитных наблюдений за вариациями геоэлектрических параметров под воздействием происходящих сейсмических событий в зонах активизации Горного Алтая.

# ОПТИМАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ И ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОНИТОРИНГА В СЕЙСМОАКТИВНЫХ РАЙОНАХ

*Неведрова Н.Н., Шалагинов А.Е.*

NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

Электромагнитные методы с контролируемым источником достаточно широко используются для мониторинга электрофизических характеристик геологического массива горных пород, подверженного влиянию природных или техногенных геодинамических процессов. К опасным явлениям, за которыми необходимо наблюдать, могут быть отнесены землетрясения, обвалы, оползни, горные удары, карстовые процессы на территориях жилой и промышленной инфраструктуры, в зонах разработки месторождений полезных ископаемых. Известно, что электромагнитные методы многочисленны, классифицируются по целому ряду характеристик, отличаются способами возбуждения и регистрации поля. Каждый из методов имеет свои преимущества и недостатки, разную глубинность исследования. Для успешного проведения мониторинга важным является выбор конкретного метода. Для регулярных наблюдений в основном привлекают модификации нестационарного электромагнитного зондирования и методы сопротивлений, такие как вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ), электротомография (ЭТ). Учитывая особенности методов, при выборе следует ориентироваться на необходимую глубинность исследования. Кроме того, опираясь на имеющийся опыт проведения мониторинга в эпицентralной зоне Чуйского землетрясения 2003 г. в Горного Алтая, можно рекомендовать измерения комплексом методов. Примером может служить мониторинг в Чуйской впадине, где по данным нескольких модификаций зондирований становлением поля (ЗС) и методов сопротивлений осуществляются наблюдения за вариациями двух электромагнитных параметров – удельного электрического сопротивления (УЭС) и электрической анизотропии ( $\lambda$ ), что безусловно расширяет информативность исследования. В результате интерпретации данных ЗС с заземленными установками (АВ-МН) получены закономерные вариации коэффициента анизотропии, связанные с изменением сейсмического режима. Вариации УЭС по данным соосных установок также отражают изменения сейсмичности, но они существенно меньше по амплитуде по сравнению с  $\lambda$ . Параметр электрической анизотропии в условиях Горного Алтая более чувствителен по сравнению с УЭС к сейсмическому режиму территории. Можно привести результат, полученный в другом сейсмоактивном регионе. Данные ВЭЗ многолетнего мониторинга в Селенгинской депрессии Байкальской рифтовой зоны позволили выявить оптимальный для этой области параметр – интегральную проводимость разреза, вариации которой увеличивались с глубиной и хорошо коррелировали с происходящими сейсмическими событиями. Таким образом, выбор параметра зависит от геоэлектрических условий участков исследования. Для анализа данных регулярных наблюдений существенно необходимы сведения о строении участка и имеющихся разломных зонах, их простириании, ширине, наклоне сместителя, поэтому параллельно с мониторингом проводятся полевые работы, направленные на уточнение геоэлектрического строения. Мониторинг, выполненный в зоне влияния разлома дает возможность оценить степень его активности. В частности, по результатам наблюдений в Чуйской впадине было показано что после разрушительного землетрясения 2003 г. был активизирован целый ряд внутривпадинных разломных структур и

наиболее значимые вариации электрофизических параметров получены в зоне влияния разломов. Безусловно важным вопросом является методика интерпретации. Все полевые данные, полученных в Горном Алтае, проинтерпретированы с использованием программных комплексов моделирования и инверсии.

---

## **ВЛИЯНИЕ НАКЛОНА МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОНИКОВЕНИЕ КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ С ЗЕМЛИ В ИОНОСФЕРУ**

*<sup>3</sup>Нестеров С.А., <sup>2</sup>Денисенко В.В., <sup>1</sup>Боудьяда М.Я., <sup>1</sup>Ламмер Х.*

*Twist3r0k@yandex.ru*

<sup>1</sup>Институт космических исследований Австрийской Академии наук, Грац, Грац, Австрия

<sup>2</sup>Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия

<sup>3</sup>Сибирский Федеральный Университет, Красноярск, Россия

Большой практический интерес представляют собой ионосферные возмущения, наблюдаемые над областями с высокой сейсмической активностью, в связи с надеждой их использования как предвестники землетрясений. В настоящее время наиболее популярные модели рассматривают литосферу как генератор, который создает электрический ток или электрическое поле в атмосфере вблизи поверхности Земли. Эти модели учитывают атмосферу и ионосферу как единый проводник и основаны на стационарной модели электропроводности. Другими словами, они рассматривают в качестве физического механизма проникновение квазистационарного электрического поля от земной поверхности в ионосферу. Основанием для появления таких моделей послужили многочисленные наблюдения возмущений вертикальной компоненты атмосферного электрического поля до и после землетрясений. На сегодняшний день известны трехмерные и двумерные модели, в рамках которых показано, что проникающие за счет электропроводности электрические поля практически не могут быть обнаружены спутниковыми измерениями на фоне всегда существующих ионосферных полей, обусловленных магнитосферными и ионосферными генераторами. Однако все такие модели построены для вертикального магнитного поля, и поэтому применимы только в высоких широтах. Целью настоящей работы является построение количественной модели проникновения квазистационарного электрического поля от земной поверхности в ионосферу при наклонном магнитном поле. Построена двумерная модель, которая применима, когда зона подготовки землетрясения вытянута по магнитной широте. На основании уравнений электропроводности сформулирована эллиптическая краевая задача, которая с помощью разложения в ряд Фурье сведена к системе обыкновенных дифференциальных уравнений. Получены аналитические решения при экспоненциальной зависимости атмосферной и ионосферной проводимости от высоты, а также численные решения для высотного распределения проводимости, соответствующего экспериментальным данным. В результате исследований подтверждены и детализированы известные приближенные оценки убывания напряженности проникающего в ионосферу электрического поля с увеличением наклона магнитного поля.

**УЧЕТ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА  
И ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ОТ РАБОТЫ  
ГОРНОТРАНСПОРТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ  
УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ, РАЗРЕЗОВ И ОТВАЛОВ**

**Никифорова И.Л., Зотеев О.В., Жариков С.Н.**

*nikiforova495@mail.ru*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия

Повышение эффективности открытой разработки месторождений на современном этапе научно-технического прогресса в решающей степени зависит от внедрения рационального сочетания различных ресурсосберегающих, малоотходных и ресурсовоспроизводящих геотехнологий, с проведением крупномасштабных массовых взрывов, применением крупногабаритного погружечно-транспортного оборудования с высоким динамическим воздействием на опоры и грузовое основание, с использованием интеллектуального оборудования и автоматизированных систем управления горными работами, широким внедрением инновационных разработок в области телекоммуникаций, навигации, радиофизики, расширения области применения комбинированной геотехнологии. Для этого на законодательном уровне должны быть закреплены нормы технологического проектирования горных предприятий с открытый способом добычи полезных ископаемых, соответствующие современным горным технологиям, знаниям о техногенном изменении недр Земли в соответствии с требованиями их комплексного освоения и сохранения. Понимая необходимость обновления нормативных документов с учетом современных методических достижений и развития геотехнологий, в соответствии с запросами крупных горнодобывающих компаний России, в 2017 году ИПКОН РАН при поддержке Ростехнадзора и Главгосэкспертизы России принял на себя роль инициатора проекта по разработке Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и отвалов» (далее – ФНП) для повышения экономической эффективности и обеспечения необходимого уровня безопасности разработки месторождений открытым способом в современных условиях. В ФНП нашли отражение требования к методам и порядку инженерно-геологического, гидрогеологического, геокриологического изучения природных и техногенных массивов горных пород, оценке и способам управления устойчивостью откосов, методике организации мониторинга состояния массивов горных пород и оценке рисков развития деформаций и нарушений устойчивости бортов карьеров, разрезов и отвалов с разработкой мероприятий по обеспечению безопасности при обнаружении критических деформаций. При оценке устойчивости бортов карьеров, разрезов и отвалов в ФНП предусмотрен учет влияния сейсмического воздействия взрыва и динамических нагрузок от работы горнотранспортного оборудования. Сейсмическое воздействие технологических взрывов на устойчивость формируемых уступов проявляется в раскрытии существующих природных и формировании техногенных трещин, образовании зоны остаточных деформаций, в том числе в горном массиве за границами зоны ведения взрывных работ. Поэтому для обеспечения устойчивости уступов карьеров и разрезов в массивах скальных и полускальных горных пород вблизи предельного контура должны в обязательном порядке учитываться способы производства буровзрывных работ, масса и вид зарядов, расстояние от места взрыва. Динамические и статические нагрузки от горнотранспортного оборудования должны быть учтены при определении общих углов наклона бортов карьеров, разрезов, отвалов.

Влияние нагрузок от оборудования на устойчивость уступов карьера, разреза в ФНП рекомендовано учитывать только при длительном, стационарном размещении на участке массива крупногабаритного оборудования, вызывающего динамические нагрузки (дробильные комплексы, скреперные комплексы и иное грузоподъемное оборудование, драглайны и проч.). Кратковременные нагрузки, возникающие при передвижении более легкого мобильного оборудования (автотранспорт, экскаваторы, буровые станки и проч.) в расчетах устойчивости уступов не должны учитываться. Учет динамических нагрузок при расчетах устойчивости уступов карьеров, разрезов и ярусов отвалов должны вестись только в случае рассмотрения слабых обводненных пород: глинистые, суглинистые, супесчаные обводненные породы. Разработка и утверждение новых ФНП по геомеханическому обоснованию устойчивости бортов и уступов карьеров позволит расширить область применения открытых геотехнологий, повысить надежность расчета параметров бортов и уступов карьеров и отвалов, полноту запасов освоения месторождений твердых полезных ископаемых открытым и комбинированным способами при обеспечении требуемого уровня безопасности горных работ, синхронизировать отечественные и мировые нормы проектного обоснования устойчивости откосов на горных предприятиях РФ, облегчить взаимодействие производственных, научных работников, проектировщиков и экспертов.

---

## ПРИБОРНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ИЗУЧЕНИЯ ТРИГГЕРНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ГЕОСИСТЕМАХ

<sup>1</sup>Николаев А.В., <sup>1</sup>Верещагин А.А., <sup>1</sup>Башилов И.П., <sup>1</sup>Осика В.И., <sup>2</sup>Юдочкин Н.А.,  
<sup>1</sup>Зубко Ю.Н., <sup>2</sup>Волосов С.Г., <sup>2</sup>Королёв С.А.

rood818181@gmail.com

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН), Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук (ИДГ РАН), Москва, Россия

Триггерные явления проявляются в аномалиях геофизических полей, их пространственно-временных характеристиках. Идея комплексных геофизических наблюдений на обсерваториях, сетях станций была и остается фундаментальной базой экспериментальных исследований. Аппаратурные средства наблюдений постоянно совершенствуются, создаются новые датчики на основе новых доступных технологий, включающих все более сложные аппаратурные решения, это касается самих сенсоров геофизических полей и методов обработки первичных геофизических сигналов, использования аналогово цифровых преобразователей, новых систем регистрации. Наиболее развитым и сложным методом геофизических исследований является сейсмический. Независимо от цели наблюдений, он использует колебания пробной массы, включенных в цепь механо-электрических преобразований, использующих электродинамические, ёмкостные, электроиндукционные преобразователи. «Триггерные сигналы» геосистем, как правило, являются аномалиями морфологических характеристик на некотором «нормальном» фоне, либо – более сложно, комбинациями признаков «распознавания» триггера. В любом случае к аппаратуре геофизических наблюдений предъявляются требования, выдвинутыми решаемой задачей. По опыту изучения триггерных эффектов в сейсмических наблюдениях, нами разработана и совершенствуется линейка электродинамических сейсмоприемников для наблюдений одиночными сейсмическими станциями, группами станций с различной апертурой, морскими, наземными,

скважинными приборами. По своей сути геофизические приборы имеют двойное назначение и могут использоваться для решения военно-прикладных задач, быть патентозащищенными. Сопоставлены технические характеристики основных типов сейсмических приборов 1980-х годов, существующие и ожидаемые в перспективе. В разработке приборов учитываются методические требования задач изучения триггерных эффектов в динамике геосфер, прикладных и фундаментальных.

---

## УПРАВЛЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ: УТОПИЯ ИЛИ РЕАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ?

**Новиков В.А.**

novikov@ihed.ras.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

Огромные человеческие потери (2,32 млн за 1900–2015 гг.) при прямом воздействии землетрясений и их последствий (цинами, оползни и сели), а также весьма неутешительный прогноз потерь на 21 столетие (свыше 3 млн чел. несмотря на значительные успехи в сейсмостойком строительстве), отсутствие в настоящее время методов надежного краткосрочного прогноза времени и места возникновения катастрофических сейсмических событий вынуждают исследователей искать альтернативные пути снижения сейсмической опасности, поскольку в настоящее время сильные землетрясения уже начинают угрожать устойчивому развитию цивилизации вследствие колоссальных прямых и опосредованных экономических потерь. Одним из таких путей являются исследования возможности внешних искусственных воздействий на деформационные процессы в очаге землетрясения с целью снижения магнитуды ожидаемого сильного землетрясения до уровня, безопасного для окружающей инфраструктуры. Идея искусственного воздействия на сейсмический режим впервые была высказана более полувека назад после установления строгой корреляции между параметрами нагнетания жидкого отходов в скважину Rocky Mountain Arsenal в г. Денвер, штат Колорадо, США и уровнем региональной сейсмической активности. Тем не менее, предложенный в то время проект по управлению землетрясениями с использованием нагнетания жидкости в сейсмогенные разломы не был поддержан ввиду высокой стоимости и неопределенности его результатов. Обзор исследований по воздействию на сейсмический режим, выполненных в основном в России, показывает пространственно-временное изменение сейсмичности в регионах внешнего искусственного вибрационного или электромагнитного воздействия, когда в периоды проведения таких экспериментов возникает локальный дефицит сильных сейсмических событий, а количество слабых толчков возрастает. Однако только констатация таких результатов, отсутствие теории и реальной методологии снижения сейсмической опасности на основе физического воздействия на очаг землетрясения вызывает определенный скептицизм, который в основном связан со следующими положениями. Первое: декларируемое сторонниками активного воздействия на очаг землетрясения искусственное «снятие избыточных напряжений» неприменимо для многих регионов, когда непосредственно перед землетрясениями никаких избыточных напряжений в районах очагов не было, а напротив, максимальные касательные напряжения были близки к своему минимальному значению (по сравнению с напряжениями на прилегающей территории). Второе: меры по предотвращению сильного землетрясения, даже будучи успешными для существующего разлома, могут спровоцировать или ускорить катастрофическое

землетрясение вследствие динамического прорастания разлома в неповрежденную область. Тем не менее, даже при таком критическом отношении скептики не рассматривают искусственное предотвращение сильных землетрясений как заведомо псевдоученое, но указывают на то, что в ближайшее время это направление рано переводить в практическую область, а необходимо продолжить теоретические исследования проблемы и полевые изучения регионального геологического строения и свойств разломов, где предполагается применять искусственное воздействие на очаг землетрясения с целью его предотвращения или снижения магнитуды. С этим трудно не согласиться, поскольку существующие физические предпосылки, несомненно указывающие на возможность управления сейсмическим процессом, недостаточно развиты и требуются дополнительные исследования. Среди методов активного воздействия на очаговую зону землетрясения (использование вибраторов, закачки флюида в разлом) наиболее привлекательным, с точки зрения простоты, стоимости и мобильности, является электромагнитное воздействие, возможности которого подтверждены в полевых экспериментах на Памире и Северном Тянь-Шане и лабораторных исследованиях на прессовом оборудовании и пружинно-блочных моделях сейсмогенного разлома. Тем не менее, в настоящее время доказана возможность инициирования землетрясения мощным импульсом электрического тока, однако для предотвращения сейсмической катастрофы требуется определить такие режимы электромагнитной обработки разлома, которые позволят перевести режим его деформирования из прерывистого скольжения в режим возникновения событий медленного скольжения («тихих землетрясений») или крипа.

---

## **ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК НА ГЛОБАЛЬНУЮ СЕЙСМИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ: АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ КЛАССА X9.3 6 СЕНТЯБРЯ 2017 г.**

**Новиков В.А., Ружин Ю.Я.**

e-mail: novikov@ihed.ras.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

Результаты исследований, выполненных к настоящему времени по взаимосвязи сейсмичности Земли и солнечными процессами, являются неопределенными и, в некоторых случаях, противоречащими. Для проверки гипотезы о возможном инициировании землетрясений солнечными вспышками проведен анализ солнечной активности в начале сентября 2017 г. в приближении минимума 24-го солнечного цикла, которая сопровождалась сильными возмущениями космической погоды. 6 сентября 2017 г. группа солнечных пятен AR2673 сгенерировала крупную солнечную вспышку класса X9.3, самую сильную вспышку за последние двенадцать лет. Эта вспышка произвела выброс коронарной массы, частично направленной в сторону Земли. Для выявления влияния этой солнечной вспышки на глобальную сейсмическую активность проведен статистический корреляционный анализ сейсмического каталога USGS, в результате которого выявлено новое подтверждение инициирования землетрясений вследствие солнечно-земных связей. Анализ проведен простым сравнением поведения сейсмичности Земли до и после сильной солнечной вспышки. Было установлено, что глобальное число землетрясений с магнитудой от 4,1 до 8,2 (диапазон выбран согласно представительности каталога USGS в соответствии с законом Гутенберга-Рихтера) в течение 10 суток после солнечной вспышки выросло на 65% по сравнению с аналогичным

периодом до вспышки. Одним из возможных механизмов активизации сейсмической активности может быть генерация резкого роста теллурических токов в разломах, индуцируемых ионосферными процессами вследствие мощной солнечной вспышки. Продемонстрированная возможность электромагнитного или электрического инициирования землетрясений вследствие сильных вариаций космической погоды поддерживается результатами полевых наблюдений и лабораторных экспериментов, когда землетрясения (как естественные, так и лабораторные) были инициированы инжекцией электрического тока в земную кору или имитатор сейсмогенного разлома. При этом уровень плотности тока в очаге землетрясения при искусственном воздействии на земную кору сопоставим с плотностью теллурических токов, наведенных в земной коре сильными вариациями космической погоды, обусловленными солнечными вспышками.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-00962).*

---

## **КРИВЫЕ ДАВЛЕНИЯ ГРП КАК СРЕДСТВО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАСТА**

**Новикова Е.В., Тримонова М.А., Турунтаев С.Б., Зенченко Е.В.**

helenvn97@gmail.com

ФГБУН Институт динамики геосфер РАН, Москва, Россия

В данной работе рассматриваются различные способы исследования кривых падения давления в скважине при проведении гидроразрыва пласта (ГРП) в применении к экспериментальным данным, полученным при лабораторном моделировании создания и распространения трещины ГРП. Определяется степень информативности полученных данных. Задача исследования состояла в определении давления закрытия трещины, которое локально необходимо для корректного численного моделирования эксперимента по ГРП, а глобально – для решения различных прикладных задач при разработке месторождений. На данный момент существуют, как минимум, три методики для определения давления закрытия трещины ГРП, которые базируются на построении различных графиков зависимостей производных и логарифмических производных давления ГРП от: а) G-функции (нейтральной функции времени), б) времени в логарифмическом масштабе и в) квадратного корня из времени. Данные методики выводятся из аналитических решений задач фильтрации для системы (пласт + скважина + трещина) в различных приближениях. Применяя данные подходы к экспериментальным данным по поведению производных и логарифмических производных давления ГРП, находится давление закрытия трещины. В рамках исследования построение различных зависимостей производных давления от некоторых функций от времени производилось для двух наиболее удовлетворяющих условиям методики экспериментальных кривых падения давления. Определяющим критерием выбора подходящих экспериментальных данных была длительность записи данных после остановки закачки жидкости разрыва в скважину. Это объясняется тем, что, чем дольше записываются данные, тем больше вероятности, что трещина закроется. К основным результатам представленной работы относится определение давления закрытия трещины в экспериментах и сравнение найденных значений с минимальным горизонтальным напряжением, созданным в образце.

## **РОТАЦИОННЫЙ ФАКТОР: ДИНАМИКА И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЯДРА И МАНТИИ ЗЕМЛИ**

**Овчинников В.М., Краснощеков Д.Н.**

krasnd@yandex.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

Кристаллическое твёрдое внутреннее ядро является самой удаленной и загадочной частью нашей планеты и, наряду с земной корой, самым небольшим объектом Земли. Внутреннее ядро было открыто в 1936 году, и к настоящему времени уже установлен целый ряд аномальных характеристик твёрдого ядра – низкая жесткость и вязкость (по сравнению с другими твердыми телами), высокое поглощение сейсмических волн, экстремальная анизотропия и дифференциальное вращение. Внутреннее ядро изолировано от твердых внешних оболочек жидким внешним ядром с низкой вязкостью и, поэтому, может вращаться, колебаться, прецессировать, осциллировать и смещаться в направлении оси вращения Земли. Его активное изучение было начато около 25 лет назад в связи проблемой возникновения и эволюции магнитного поля Земли. Величина скорости дифференциального вращения внутреннего ядра относительно мантии важна также для объяснения ряда геодинамических процессов, например, таких как наблюдаемое распределение сейсмичности, приуроченное к «критическим» широтам. Одна из гипотез связывает эту особенность с вариациями скорости вращения Земли. В нашем докладе мы анализируем публикации, выполненные к настоящему времени по исследованию дифференциального вращения внутреннего ядра Земли, и отмечаем отсутствие консенсуса: оценки скорости дифференциального вращения по временем пробега объемных волн находятся в интервале от 0 до 3 градусов в год, а оценки скорости на основе собственных колебаний Земли лежат в интервале от 2.5 до -0.8 градуса в год с наиболее вероятным интервалом от -0.2 до 0.2 градуса в год. Вряд ли можно ожидать стационарного вращения внутреннего ядра с запада на восток, как это следует из численного моделирования эволюции магнитного поля Земли, проведённого Глацмайером и Робертсоном. Скорее всего этот процесс нестационарный – с замедлением и ускорением, которые, в свою очередь, могут быть связаны с вариациями скорости вращения мантии.

*Исследование выполнено в рамках темы гос. задания № 0146-2019-004 Плана НИР ИДГ РАН.*

---

## **ВЛИЯНИЕ ВЗРЫВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА**

**Одинцов В.Н.**

e-mail: Odin-VN@yandex.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия

Проблема предотвращения опасных газопроявлений в угольных шахтах по-прежнему остается актуальной, о чем свидетельствуют резонансные катастрофы в шахтах ряда стран. Катастрофические события связаны с внезапным появлением огромного количества свободного газа (метана), хотя изначально метан в слабо проникаемых пластах почти на 90% находится в абсорбированном состоянии внутри угольного вещества. Появление свободного метана обусловлено разрушением угольного пласта и часто последующим выбросом угля и газа в горную выработку.

В работе рассматривается механизм разрушения угля за счет метана, переходящего из природного связанного состояния в свободное при взрывном воздействии на непроницаемый угольный пласт. Исследование проводилось по двум направлениям: моделирование действия взрывной волны в дальней от взрывной скважины зоне (в зоне предразрушения геоматериала, расположенной на расстоянии более 20 радиусов скважины) и моделирование развития в этой зоне наведенных взрывной волной микротрещин за счет диффузии метана в микротрещины и развития трещин за счет давления свободного метана. Моделирование действия взрывной волны в указанной зоне показало, что при использовании детонационных ВВ на фронте волны формируются импульсы сжатия и последующего растяжения геоматериала. При этом продолжительность импульса растяжения превышает 100 мкс, а величина растяжения – несколько МПа, что достаточно для раскрытия природных дефектов в угле и образования раскрытых микротрещин. Выход метана в эти микротрещины описывается системой уравнений, которые отражают разные физические составляющие процесса. Система уравнений включает: 1) уравнение твердотельной диффузии молекул метана из угольного вещества в микротрещину, 2) уравнение состояния свободного метана в трещине, 3) уравнение изотермы Ленгмюра, позволяющее оценить долю поверхности берега в микротрещине, свободную от адсорбированных молекул, через которую возможна диффузия молекул метана в трещину, 4) уравнение раскрытия трещины в упругой среде за счет давления свободного метана, 5) уравнение предельно равновесного состояния трещины Гриффитса–Ирвина. Моделирование позволило выявить некоторые следствия процесса перехода метана из растворенного состояния в свободное, которые были установлены впервые. В частности, показано, что в зависимости от соотношения определяющих параметров заполняемые метаном микротрещины в одних случаях являются стабильными, в других – могут начать развитие в динамическом режиме, что является необходимым условием макроразрушения угольного пласта в виде выброса угля и газа. Для последнего случая определено время подготовки трещины к динамическому развитию, которое определяется, главным образом, трещиностойкостью, газоносностью угля и значением коэффициента диффузии. Показано, что в зависимости от условий время начала развития трещин может варьироваться от нескольких секунд до нескольких часов, что соответствует натурным данным о начале спровоцированных выбросов угля и газа после взрывного воздействия на пласт. Из проведенных модельных исследований следует, что взрывное воздействие на непроницаемый угольный пласт проявляется в образовании сравнительно крупной метастабильной области предразрушения угля, в которой наведенные микротрещины достаточно быстро заполняются свободным метаном, что создает в пласте очаг выброса угля и газа. Взрывное воздействие, следовательно, является своеобразным триггером газодинамического разрушения угля. Результаты исследований могут быть использованы при разработке мер по повышению эффективности метода сотрясательного взрывания угольного пласта, используемого иногда в шахтах в качестве технологического средства искусственного провоцирования выбросов угля и газа в опасных горно-геологических условиях и предотвращения, тем самым, неспровоцированных, внезапных выбросов угля и газа.

*Работа выполнялась при поддержке РФФИ (проект № 18-05-00912).*

## **КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ТЕКТОНИЧЕСКОГО РАЗЛОМА ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ**

***<sup>1</sup>Остапчук А., <sup>1</sup>Горбунова Э., <sup>1</sup>Павлов Д., <sup>2</sup>Григорьева А., <sup>1</sup>Беседина А., <sup>3</sup>Ружич В.***  
*<sup>1</sup>ostapchuk@idg.chph.ras.ru*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

В работе представлены результаты комплексных геолого-геофизических исследований, направленных на выделение зоны интенсивных деформаций и определение её минералогических и механических характеристик. Исследуемый объект представляет собой экскавированный с глубины 10–18 км участок Приморского разлома Байкальской рифтовой зоны. Полевые исследования проводились в течение 2 недель и включали: (i) геологическое обследование центральной зоны разлома с отбором образцов тектонитов и их петрофизическое описание, (ii) деформационный мониторинг зоны магистрального сместителя, (iii) сейсмический мониторинг центральной зоны разлома. Петрографический анализ тектонитов показал, что наиболее интенсивные сдвиговые деформации локализованы в узкой зоне шириной около 5 см. В данной области наблюдается графитизация горной породы, выделяются разноориентированные трещины, свидетельствующие о более поздних процессах тектонического и метаморфического воздействия. Согласно данным деформационного мониторинга на современном этапе разлому присущ сбросо-сдвиговый тип деформирования. Средняя скорость смещения берегов разлома составляет 2 мм/год, при этом наблюдается большое число относительно быстрых подвижек. Также выявлены 2 крупные медленные подвижки длительностью более 1 дня, при которых аккумулированная деформация составила 3e–5 и 6e–5, соответственно. Использование метода кросс-корреляции сейсмического шума при анализе микросейсмического шума позволил оценить жесткость разлома, которая составила ~ 100 МПа/м. Проведенные исследования указывают на то, что Приморский разлом на современном этапе является тектонически-активной геологической структурой, а выбранный комплекс исследований позволяет в полной мере описать геомеханическую модель исследуемого участка Приморского разлома.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-05-01271).*

---

## **ИНИЦИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ НА РАЗЛОМЕ С ГЕТЕРОГЕННОЙ СТРУКТУРОЙ**

***Остапчук А.А., Павлов Д.В., Морозова К.Г.***

e-mail: *ostapchuk@idg.chph.ras.ru*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

Изучение катастрофических явлений, к которым относятся и крупные землетрясения, и склоновые явления, является одним из приоритетов в области наук о Земле. Принятие решений, направленных на снижение ущерба от природных катастроф, требует достаточной ясности в понимании их физических механизмов. Возрастание количества и увеличение энергии сейсмических событий, индуцированных техногенными изменениями напряженно-деформированного состояния

массива горных, обуславливает высокую степень значимости решаемой проблемы и для горных наук. Хорошо известно, что механические колебания вызывают кратковременные флуктуации напряженного состояния. Данные флуктуации могут оказывать существенное влияние на режим деформирования и свойства локальной области земной коры. В настоящей работе основное внимание направлено на выявление условий инициирования динамических срывов слабыми ударными воздействиями на модельном разломе с гетерогенной структурой. Исследования проводились на геомеханическом стенде лаборатории деформационных процессов в земной коре ИДГ РАН, на установке «слайдер»-модели. Модельный разлом представляет собой контакт гранитного блока с гранитным стержнем, центральная зона контакта выполнена многокомпонентным заполнителем. Под действием нормального и сдвигового усилий разлом деформируется в режиме прерывистого скольжения. В ходе лабораторного сейсмического цикла в системе возбуждались упругие колебания ударами стальных шариков, и контролировался акустоэмиссионный отклик на это воздействие. В ходе экспериментов были исследованы параметры акустоэмиссионного отклика (задержка отклика, закономерности роста и снижения активности АЭ, волновой индекс) на внешнее импульсное воздействие. В зависимости от амплитуды и характерного периода возмущения на межсейсмической стадии цикла может быть инициирован как отдельный всплеск акустоэмиссионной активности, так и формирование динамических «микросрывов», а на заключительной стадии сейсмического цикла – динамический срыв. Полученные результаты указывают, что (i) анализ параметров акустоэмиссионного отклика позволяет оценивать напряженное состояние локального участка разлома и (ii) на основе результатов воздействия на межсейсмической стадии можно определить оптимальные параметры возмущения для инициирования динамического срыва максимальной интенсивности.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-05-01271).*

---

## **ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИАГНОСТИКИ НДС МАССИВА ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ В РАЙОНЕ г. КАТАВ-ИВАНОВСК**

**Панжин А.А., Панжина Н.А.**

*panzhin@igduran.ru*

Институт горного дела Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

Сейсмичность Уральского Региона характеризуется большим количеством мелкофокусных событий с магнитудой 2–3. В сентябре 2018 года на Южном Урале произошла серия землетрясений с магнитудами 4.2–4.5. Эпицентр землетрясений находился в 7 км. северо-западнее города Катав-Ивановск на глубине 10 км. Ранее геодинамические исследования на Урале проводились в основном геофизическими методами, постоянные деформационные измерения ведутся на единственной IGS станции ARTU. Исследования геодинамики Северного и Среднего Урала по данным GPS были выполнены под руководством В.И. Уткина (ИГФ УрО РАН) в 2009–2010 гг. При переопределении координат пунктов геодезических сетей было определено изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) массива. *Сделаны выводы:* 1. Уфимский выступ Восточно-Европейской плиты является тектоническим образованием, которое в современное время продолжает медленное движение на восток, вклиниваясь в Уральскую структуру. 2. Движение Уфимского выступа неизбежно будет происходить и в будущем времени и приводить к накоплению упругих напряжений на границах выступа, которые при своей разрядке могут вызвать достаточно сильные землетрясения. 3. Отмечена необходимость

организации с целью возможного прогнозирования следующего крупного тектонического события детального геодинамического мониторинга в районе Уфимского выступа Восточно-Европейской плиты. В дальнейшем мониторинг НДС не был организован и исследования не проводились. Однако в Институте горного дела велись исследования региональной геодинамики с использованием исходных данных постоянно действующих GNSS станции Урала. Производилось вычисление их координат от пунктов IGS, определение скоростей в системе ITRF-2014, построение полей сдвигений и деформаций по разностям скоростей. В связи с произошедшим в сентябре 2018 года землетрясением, был проведен эксперимент, в котором было задействовано 9 постоянно действующих GNSS станций Южного Урала. Размеры района исследований составил 280x250 км. Была сделана выборка исходных данных за период с 15.08. по 15.10.2018 гг., для фиксации движений и деформаций до и после землетрясения. Программа эксперимента включала: (1) определение абсолютных координат и их изменения по осям координат ежесуточно, за 61 сутки, путем привязки их от 10–12 исходных пунктов IGS в системе INRF-2014, (2) обработку и уравнивание GNSS сети, для исследования трендовых движений. В результате были определены: (1) суточные амплитуды изменений координат по трем осям координат, амплитудная и трендовая составляющие до землетрясения, между сериями землетрясений и после землетрясений, (2) горизонтальные сдвигения и деформации массива горных пород в районе в виде перемещений на восток с амплитудами 7–10 мм, (3) зафиксированы вертикальные сдвигения, которые проявляются в виде равномерного наклона: поднятия в юго-западной части, оседания на северо-востоке, (4) отмечены деформации растяжения в юго-западной и западной частях участка под азимутами 135 и 45°, в восточной части преобладают сжимающие деформации. Также построены азимут-диаграммы сдвигений по всем возможным  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta H$ , 2D, 3D между пунктами GNSS сети. Установлено и соответствие, и несоответствие по основным направлениям преобладающих ориентировок разломов в Уральском регионе по С.Н. Тагильцеву (УГГУ). Сделаны выводы о необходимости расширения GNSS сети до 25–30 пунктов за счет включения дополнительных станций по внешнему контуру.

---

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕНЗОРА СЕЙСМИЧЕСКОГО МОМЕНТА СОБЫТИЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ТРЕХТОЧЕЧНОМ ИЗГИБЕ МРАМОРА

*Пантелейев И.А.*

e-mail: pia@icmm.ru

Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия

Настоящая работа посвящена разработке и программно-аппаратной реализации комплекса алгоритмов, направленных на определение тензора сейсмического момента событий акустической эмиссии, зарегистрированных в лабораторных экспериментах. Полная информация о тензоре сейсмического момента позволяет для конкретного события определить, как его механизм, так и ориентацию плоскости разрыва вместе с направлением смещения. Декомпозиция механизма источника акустической эмиссии на шаровую компоненту (ISO) и две девиаторных (двойной диполь DC и компенсированный линейный диполь CLD) дает дополнительную информацию о преобладающем вкладе той или иной моды деформирования. Существующие в сейсмологии алгоритмы восстановления компонент тензора сейсмического момента требуют существенной модернизации и адаптации для применения

к данным акустической эмиссии. Разработанный авторами комплекс алгоритмов включает в себя: алгоритм определения времени вступления Р-волны, двухстадийный метод уточнения решения пространственной задачи локации на основе USBM метода, процедуру абсолютной калибровки датчиков акустической эмиссии и последующей деконволюции волновых форм для определения абсолютной величины амплитуды Р-волн, а также трехступенчатый алгоритм определения тензора сейсмического момента и его уточнения. На первом этапе найденное решение для компонент тензора сейсмического момента уточняется с помощью гибридного алгоритма инверсии тензора сейсмического момента [1]. Суть гибридного алгоритма заключается в итеративном уточнении амплитуд Р-волн, зарегистрированных различными датчиками в антenne, для минимизации невязки между найденным решением (смещением на конкретном датчике) и теоретически рассчитанным. Применение итеративного метода позволяет скорректировать найденное решение на систематическую ошибку в определении механизма источников, расположенных в кластере (близко друг к другу), вызванную внешним шумом, качеством акустического контакта между датчиками и материалом, локальными неоднородностями на траектории распространения волны. На второй ступени все найденные решения (для всех локированных источников акустической эмиссии) проверяются на устойчивость к вариациям амплитуд волн, зарегистрированных антенной (согласно методике, предложенной в [2]). На третьем этапе для оставшихся решений вычисляется среднеквадратичная невязка между зарегистрированными амплитудами перемещений и теоретически предсказанными, и отбраковываются те решения, невязка по которым превышает также 50%. Апробация разработанного комплекса алгоритмов проведена на акустико-эмиссионных данных, полученных при трехточечном изгибе образцов мрамора месторождения Коелга. Решение задачи локации показало, что большинство зарегистрированных событий акустической эмиссии концентрируются в районе будущей магистральной трещины. Последовательно решены задачи определения и уточнения механизмов событий акустической эмиссии. После третьего этапа уточнения из исходных 1669 решений механизмов источников акустической эмиссии осталось 557. Установлено, что преобладающее большинство механизмов относится к трещинам нормального отрыва (схлопывающимся и раскрывающимся) с различной величиной дополнительной сдвиговой составляющей. Анализ распределений угла погружения двух нодальных плоскостей для найденных решений показал наличие преимущественного направления погружения в районе 35–40 градусов. По направлению подвижки найденные механизмы источников акустической эмиссии являются сбросами и взбросами. Также показано, что в первой половине эксперимента по изгибу 1 образцов мрамора, количество источников акустической эмиссии с положительной (раскрытие) и отрицательной (закрытие) шаровой частью растет согласовано и пропорционально, тогда как ближе к моменту появления макроскопической трещины, количество раскрывающихся трещин начинает преобладать.

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

#### Литература

1. Andersen L.M. (2001) A relative moment tensor inversion technique applied to seismicity induced by mining, Univ. of the Witwatersand, Johannesburg
2. Vavrycuk V. Inversion for parameters of tensile earthquake. Journal of geophysical research. 2001. V. 108(B8). 16339–16355.

## **СИНХРОНИЗАЦИЯ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНЫХ СВОЙСТВ НЕПРЕРЫВНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ПОДГОТОВКЕ И РЕАЛИЗАЦИИ ПОДВИЖКИ ПО МОДЕЛЬНОМУ РАЗЛОМУ**

**<sup>1</sup>Пантелейев И.А., <sup>2</sup>Окунев В.И., <sup>2</sup>Новиков В.А.**

pia@icmm.ru

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия

<sup>2</sup>Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия

В работе проведено экспериментальное исследование корреляционных свойств непрерывной акустической эмиссии, зарегистрированной при подготовке и реализации динамической подвижки в лабораторной модели разломной зоны. Лабораторная модель разломной зоны представляет собой классическую «слайдер-модель», в которой блок под действием приложенного сдвигового усилия скользит по поверхности раздела. Регистрация акустической эмиссии осуществлялась несколькими датчиками, установленными на боковых поверхностях подвижного блока и неподвижном основании с разных сторон от блока. Для поиска интервалов синхронизации статистических свойств АЭ при подготовке и реализации динамической подвижки, проводилось вычисление параметров мультифрактального спектра сигнала АЭ с каждого из датчиков (с использованием метода MF-DFA), и последующие вычисления спектральной меры когерентности для различного набора временных рядов параметров спектра в скользящем временном окне трех различных размеров, 13.4, 53, 429.5 секунд. В результате проведенного анализа был подтвержден гипотеза о синхронизации статистических свойств акустической эмиссии при подготовке и реализации динамической подвижки. Показано, что наблюдение (выявление) эффекта синхронизации статистических свойств АЭ зависит как от набора параметров, для которых рассчитывается спектральная мера когерентности, так и от места регистрации исходных данных. Установлены оптимальные параметры и наборы исходных данных для наблюдения эффекта синхронизации мультифрактальных свойств акустической эмиссии до и после динамической подвижки. Выявлены интервалы и особенности предвестниковых изменений спектральной меры когерентного поведения многомерных временных рядов параметров акустической эмиссии. Полученные результаты демонстрируют перспективность использования данного подхода для акустического мониторинга реальных активных разломов, а также необходимость дальнейших исследований обнаруженного эффекта синхронизации с целью определения влияния на него таких факторов как состав, физико-механические свойства и влажность заполнителя, скорость и режимы скольжения.

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

---

## **ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА РАЗВИТИЕ ТРЕЩИН В ГОРНЫХ ПОРОДАХ**

**<sup>1</sup>Панфилов П.Е., <sup>2</sup>Кочанов А.Н., <sup>1</sup>Панфилов Г.П., <sup>1</sup>Зайцев Д.В.**

peter.panfilov@urfu.ru

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Москва, Россия

Прочностные свойства горных пород (ГП), обладающих развитой иерархически организованной структурой, зависят от многих факторов, среди которых важнейшими являются наличие дефектов строения и влияние внешней среды, например,

воды. Одним из методов, позволяющих смоделировать их влияние на прочность породы, является лабораторный эксперимент. Использование малогабаритных образцов, размерами порядка нескольких миллиметров, дает возможность проводить механические испытания и микроскопическую аттестацию поверхности на одних и тех же образцах. В настоящем докладе приводятся данные такого рода исследований, проведенных авторами за последние несколько лет. В качестве модельных материалов были взяты: магматические ГП – гранит; осадочные ГП – песчаник, яшма, каменный уголь; метаморфические ГП – кварцит, серпентинит и мрамор. Исследования проводили на малогабаритных образцах цилиндрической формы, диаметром 6 и толщиной 3 мм. Часть образцов гранита содержала трещины, возникшие в результате взрывного воздействия ни исходную заготовку. Механические испытания образцов выполняли по схеме диаметрального сжатия / непрямого растяжения при комнатной температуре, как на воздухе, так и в воде (скорость траверсы 0.1 мм/мин). Развитие трещин в образцах изучали при помощи оптического микроскопа, а морфологию изломов изучали на сканирующем электронном микроскопе. На макроскопическом уровне при растяжении все образцы демонстрировали хрупкое деформационное поведение, независимо от типа ГП и среды испытания. Наличие в образцах таких дефектов как трещины и крупные поры не приводило к качественным изменениям в поведении ГП. Под действием воды в граните, кварците, серпентините и осадочных ГП (песчанике и угле) происходило незначительное снижение предела прочности и деформации до распада на части, что, однако, не отразилось на морфологии поверхности изломов образцов. Это было хрупкое внутризеренное разрушение, тогда как в яшме, мраморе разрушение было хрупким межзеренным. Следовательно, охрупчивание ГП первых двух групп за счет снижения когезионной прочности границ зерен под действием воды можно исключить, поскольку участков хрупкого межзеренного разрушения на изломах не было. Данная особенность может быть объяснена эффектом Ребиндера, когда под влиянием воды активируется процесс зарождения и движения дефектов-носителей пластической деформации – дислокаций. Траектория движения опасной трещины в образцах ГП определялась геометрией приложения нагрузки и не зависела от среды испытания. При испытании в магматических ГП и осадочных ГП на воздухе, длина магистральной трещины оказывается сравнимой с диаметром образца, а при испытаниях в воде она была 60–70% диаметра образца. Ширина трещины в образцах, испытанных на воздухе, была в 2–3 раза больше, чем в образцах, деформированных в воде. Магистральная трещина состояла из порообразных микротрецин, которые имеют тенденцию к слиянию друг с другом. Подобным образом развиваются трещины в шейке на плоских образцах пластичных металлов. Длина микротрецин в образцах, в отличие от их ширины, не зависела от среды испытания. Следовательно, на микроскопическом уровне магматические ГП (гранит), а также метаморфические (кварцит и серпентинит) и осадочные ГП демонстрируют вязкоупругое поведение. Это можно объяснить тем, что на микроуровне для данного типа ГП из-за их структурных особенностей существует механизм аккомодации напряжений, конкурирующий с ростом трещины – необратимая деформация или микропластичность.

*Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 15-19-10007).*

## **СЛОЖНОЕ СТРОЕНИЕ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАЗЛОМОВ: СВИДЕТЕЛЬСТВО СТАТИЧЕСКОГО И ДИНАМИЧЕСКОГО ИНИЦИРОВАНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

**Пападимитриу Э., Каракостас В.**

*ritsa@geo.auth.gr*

Геологический факультет, Школа Геологии, Университет им. Аристотеля Тессалоники, Тессалоники, Греция

Несмотря на существенные успехи в изучении механических свойств разломов и их взаимодействие через поле напряжений, остается нерешенной проблема оценки периода повторяемости сильнейших землетрясений, связанных с основными разломами в данной области. Это позволило бы определить место и время ближайшего ожидаемого сильного события. Результаты моделирования взаимодействия напряжений в разломной зоне показали, что ко-сейсмический сдвиг (скольжение по разлому) в результате сильного землетрясения увеличивает вероятность возникновения землетрясений в ближней зоне. Расчеты изменений величины Кулоновского напряжения в системе разломов позволили объяснить положения афтершоков, пространственную эволюцию последовательности землетрясений и их отсутствие в сейсмоактивных районах. Изменения статического напряжения могут быть важным пусковым механизмом для близких афтершоков. Влияние изменений статического напряжения может также проявляться на расстояниях от нескольких длин разломов до нескольких сотен километров, несмотря на их незначительную абсолютную величину даже по сравнению с приливными напряжениями. Вероятным механизмом триггерного воздействия может служить прохождение сейсмических волн, которые либо непосредственно способствуют скачку кулоновского напряжения, либо запускают вторичный механизм отсроченного действия. Прохождение сейсмических волн может также играть важную роль в инициировании близких землетрясений. Эффект взаимодействия разломов изучен в региональном масштабе на основе оценки распределения напряжений в системе разломов после крупного события на главном разломе. Напряжения накапливаются на оперяющих разломах, и в ряде случаев это приводит к длительному росту тектонической нагрузки в системе разломов. Разрядка аккумулированного напряжения реализуется в виде последующих событий непосредственно вслед за главным или через несколько десятилетий. Приведены результаты наблюдения указанного эффекта на системах разломов различных типов в Греции и других районах.

---

## **ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИНЫ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРЫВА В НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ**

**Пестов Д.А.**

*dmitr-ey94@mail.ru*

Федеральное государственное бюджетное учреждение Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук, Москва, Россия

В настоящее время гидроразрыв пласта является основным по применимости способом интенсификации добычи нефти и газа. После проведения гидроразрыва в породе остаётся трещина или сеть трещин, увеличивающих проницаемость породы и позволяющих ускорить добычу полезных ископаемых. Для оценки размера и ориентации получающейся трещины или системы трещин проводят моделирование этого процесса. Между тем, наличие в породе имеющихся природных разломов или неоднородность поля напряжений в окружающей среде зачастую не

учитывается, что может приводить к неверной оценке ориентации или размеров трещины. В данной работе представлена модель роста трещины гидроразрыва в среде под действием неоднородного поля напряжений, построенная и численно реализованная с использованием методов механики сплошных сред, представлен анализ влияния изменений в поле напряжений на ориентацию и размеры трещины, а также проведено сравнение результатов моделирования с имеющимися аналитическими решениями в случае однородной среды. В работе использованы аналитические формулы расчета отклонения трещины от плоскости распространения, а также метод расчета напряжений в окрестности трещины на основе метода разрывных смещений. При помощи полученной модели исследовано поведение трещины при различных конфигурациях среды. Например, после преодоления области, находящейся под большим по сравнению с окружающей породой давлением, трещина распространяется быстрее чем трещина, движущаяся при тех же условиях в отсутствие подобной области. Эти результаты показывают на заметное влияние учета неоднородности напряжений на точность результатов моделирования.

*Исследование проведено при поддержке РФФИ (грант № 18-07-00513).*

---

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ФРОНТА ОКИСЛЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ С ВЫДЕЛЕНИЕМ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

*Плавник Р.А., Завьялов И.Н.*

*rinat-plavnik@yandex.ru*

Московский физико-технический институт (НИУ), Долгопрудный, Россия

В настоящее время имеются крупные трудноизвлекаемые запасы углеводородов, извлечение которых требует развития оригинальных методов добычи. Одним из методов увеличения нефтеотдачи является использование кислотной обработки пласта. Суть метода заключается в закачке в пласт кислот способных растворять часть скелета и создавать высокопроницаемые каналы. Однако в настоящий момент процесс фильтрации с изменением фазового состава фильтрующихся компонент из-за химических превращений изучен мало. Ранее было обнаружено, что фильтрационный изотермический процесс с выделением газовой фазы может быть нестабилен [1; 2]. Авторы указывают, что фильтрация окислителя происходит волнами, названными «вторичными волнами окисления». Однако в ходе указанных работ не было выполнено исследований, описывающих параметры, от которых зависит или не зависит частота и амплитуда вторичных волн окисления. Целью данной работы является лабораторное исследование зависимости частоты и амплитуды вторичных волн окисления от вызывающего фильтрацию перепада давления, деленного на длину пористой среды, в которой наблюдалась фильтрация. Для проведения экспериментальной работы использовалась плоская ячейка размерами 350x200x45 мм, образованная двумя прозрачными пластинами из поликарбоната с внутренним пространством размерами 350x160x15 мм. В верхней части ячейки установлены выходы трубок, соединенных с перистальтическим насосом, и система поддержания постоянного давления из тонких трубочек. Вдоль ячейки располагаются 15 датчиков давления с шагом 20 мм. В начале эксперимента ячейка заполнялась стеклобисером, смешанным с восстановителем (пищевой содой), после чего смесь насыпалась минеральным маслом. Далее через подающую трубку закачивался окислитель (раствор лимонной кислоты). В результате фильтрации окислителя через модель пористой среды, наблюдались вторичные волны окисления, возникающие с некоторым постоянным периодом. В экспериментах на

датчиках давления наблюдались периодические колебания давления. В результате экспериментальной работы было установлено, что период колебания давления во вторичных волнах окисления не зависит, а амплитуда слабо зависит от перепада давления, деленного на длину ячейки.

#### Литература

1. Konyukhov A.V., Zavialov I.N. Numerical investigation of oscillatory multiphase flow in porous medium with chemically active skeleton //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2016. Т. 774. №. 1. С. 012059.
2. Konyukhov A.V., Zavialov I.N. Influence of time-delayed reaction on stability and transition to self-oscillating mode of multiphase flow in porous medium // Turbulent Mixing and Beyond Sixth International Conference Tenth Anniversary Program, The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Italy, 2017, P. 22.

---

## АППРОКСИМАЦИОННЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ ИЗ-ЗА ВОЗДЕЙСТВИЯ БОЛЬШИХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

*Подобная Е.Д., Глазачев Д.О., Попова О.П., Светцов В.В., Шувалов В.В.*

*epodobnaya@gmail.com*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

Данная работа является частью проекта, посвященного разработке калькулятора последствий падения крупных космических тел, который дает возможность получить быструю оценку для всех возникающих опасных эффектов. Такие эффекты нельзя полноценно исследовать в лаборатории, а численное моделирование даже одного варианта падения занимает большое количество времени и требует высокой компьютерной мощности. Поэтому большинство оценок опирается на аппроксимационные зависимости, полученные тем или иным способом. Излучение, возникающее из-за взаимодействия с атмосферой космического объекта и выбросов из образующегося кратера, является одним из основных опасных последствий кратерообразующих ударов. Тепловое излучение может привести к обширным возгораниям и даже к плавлению породы. Оценивать действие теплового излучения можно на основе данных о ядерных взрывах или на основе специально разработанной модели. Ранее было проведено численное моделирование теплового воздействия, возникающего при ударах каменных и ледяных тел разных размеров (300 м, 1 км и 3 км) с различными углами и скоростями входа в атмосферу. Эти расчеты послужили основой для построения аппроксимационных соотношений для наиболее важных параметров теплового излучения, представленных в данной работе. Данные зависимости позволяют оценить характеристики теплового излучения, опираясь только на свойства импактора. Предложенные аппроксимационные соотношения являются удобным и достаточно точным инструментом для быстрых оценок, они могут быть использованы в интернет приложении – калькуляторе, предназначенном для оценки всех эффектов импактов космических тел. Наши соотношения используются в разрабатываемом калькуляторе, чья тестовая версия расположена по ссылке <http://www.AsteroidHazard.pro>.

**ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ D-СЛОЯ ИОНОСФЕРЫ  
ВО ВРЕМЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ВСПЫШЕК НА ОСНОВЕ ДАННЫХ  
МОНИТОРИНГА СДВ ПЕРЕДАЧИКОВ В ГФО «МИХНЕВО»**

**Поклад Ю.В., Гаврилов Б.Г., Ермак В.М., Ляхов А.Н.,  
Рыбаков В.А., Ряховский И.А.**

poklad@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

На протяжении нескольких лет, сигналы от станций, работающих в КНЧ диапазоне, регистрируются в ГФО «Михнево». Среди станций, принимаемых в ГФО «Михнево», есть 2 передатчика GQD и GBZ работающих на частотах 22.1 и 19.58 кГц. Расстояние между этими передатчиками составляет 32 км, поэтому можно считать, что сигналы от них распространяются по одной трассе. В рамках двухпараметрической модели D-слоя ионосферы Фергюсона-Уайта по измеренным значениям амплитудно-фазовых характеристик сигналов от этих передатчиков были восстановлены профили электронной концентрации на трассе распространения сигнала. В этой модели высотный профиль электронной концентрации описывается с помощью двух величин:  $h'$  – эффективная высота отражения и  $\beta$  – параметр, определяющий скорость роста электронной концентрации, или «жесткость» верхней стенки волновода. Для восстановления профиля электронной концентрации использовалась программа LWPC. В работе рассмотрены результаты измерений во время нескольких рентгеновских вспышек М и Х классов. Построены зависимости эффективной высоты отражения СДВ сигнала и «жесткости» верхней стенки волновода от потока рентгеновского излучения (по данным спутника GOES). Проведен анализ влияния «жесткости» рентгеновского излучения на характеристики D-слоя ионосферы. Показано, что во время рентгеновских вспышек эффективная высота отражения уменьшается до 60–65 км. При этом основное влияние на величину эффективной высоты отражения оказывает рентгеновское излучение в диапазоне 0.5–4 А. Отмечено, что во время рентгеновской вспышки сильно меняются коэффициенты рекомбинации ионизированной компоненты. Данная особенность характерна для эффективной высоты отражения порядка 70–74 км.

---

**РАЗРУШЕНИЕ ГОРНОЙ ПОРОДЫ ПРИ ИНЖЕКЦИИ  
ФЛЮИДА – ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ТРИГГЕРНОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ**

**<sup>1</sup>Пономарев А.В., <sup>1,2</sup>Смирнов В.Б., <sup>3</sup>Патонин А.В., <sup>1</sup>Михайлова В.О., <sup>1</sup>Строганова С.М., <sup>1,2</sup>Потанина М.Г., <sup>1,2</sup>Бондаренко Н.Б., <sup>1</sup>Фокин И.В., <sup>3</sup>Шихова Н.М.,  
<sup>4</sup>Арора К., <sup>4</sup>Чадда Р., <sup>4</sup>Давулури Ш., <sup>4</sup>Раза Х.**

e-mail: avp46@mail.ru

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

<sup>3</sup>Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Федерального бюджетного государственного учреждения науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, пос. Борок, Некоузский р-н, Ярославская обл., Россия

<sup>4</sup>Национальный геофизический исследовательский институт, Хайдерабад, Индия

Природа наведенной сейсмичности связывается большинством исследователей с увеличением порового давления под действием дополнительных напряжений,

возникающих при заполнении водохранилища, или с диффузией порового давления. Первый механизм может объяснить почти немедленный отклик сейсмичности при изменении объёма воды в водохранилище, а второй – задержанный отклик, что наблюдается в полевых наблюдениях. Для прояснения роли этих механизмов выполнены пилотные лабораторные эксперименты по инициированию процессов разрушения при повышении порового давления и фильтрации флюида при различных режимах нагружения на образцах различных пород. Все эксперименты осуществлялись при постоянном всестороннем давлении от 10 до 40 МПа, различных уровнях действующих напряжений и ступенчатом повышении порового давления. Величина порового давления менялась от 1 до 15 МПа и на интервале ступени поддерживалась постоянной. Перед опытами образцы высушивались в течение 12 часов при температуре 70°C. Основная цель экспериментов на этом этапе заключалась в изучении условий инициирования акустической эмиссии при (АЭ) повышении порового давления и фильтрации флюида в нагруженном образце горной породы. С целью экспериментальной проверки предположения о природе реактивации сезонной сейсмичности на юге от водохранилища Койна были проведены эксперименты на образцах тестовых песчаников и рабочих гранитов из области Койна-Варна, направленные на выяснение вопроса о величине задержки отклика режима АЭ при обводнении сухого образца и распространении волны давления в насыщенном образце. В образце сначала сформировалась «разломная зона» качественно моделирующая генеральную разломную зону, вдоль которой, согласно предположению, происходила диффузия флюида. Далее в условиях одноосного нагружения при постоянном давлении всестороннего сжатия через торец образца скачками подавалась вода. Скачки порового давления вызывали увеличение АЭ, максимум которой достигался с задержками относительно момента скачка порового давления. Эта задержка инициации разрушения при распространении флюида в сухой среде оказалась в несколько раз больше, чем при распространении фронта диффузии порового давления в насыщенной среде. Тем самым, результаты проведенных экспериментов на качественном уровне подтверждают предположение о природе реактивации сезонной сейсмичности на юге от водохранилища Койна, которую мы связали с различной скоростью волн первичного обводнения и последующих фронтов порового давления, вызванных заполнением и эксплуатацией водохранилища Койна. Обнаружено, что ступени порового давления вызывали как наведённую акустическую активность с резким фронтом и постепенной релаксацией до фонового уровня, так и активизацию «роевого» типа. Последняя, как правило, реализуется при относительно малых величинах порового давления, порядка 1 МПа и менее. Наконец, в ряде экспериментов выявлен эффект заметной, в десятки секунд и более, задержки максимума акустического отклика относительно момента подачи порового давления. Заметим, что в реальных условиях наведённая сейсмичность в районе Койна-Варна также характеризуется как быстрым, так и задержанным откликом на заполнение водохранилиш, причём механизм задержки остаётся неясным.

# ДВУХФАЗНАЯ МОДЕЛЬ ПРЕДШОКОВОЙ СТАДИИ ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПРИМЕНЕЛЬНО К БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЕ

**Пономарёва Е.И.**

Squirrel@crust.irk.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

Известно, что во многих распространенных моделях формирования очагов землетрясений выделяются 4 стадии: асейсмического крипа, предшоковая, шоковая и афтершоковая. При детальном изучении подготовки землетрясений в Байкальской рифтовой зоне (БРЗ) и других сейсмоопасных регионах, выявлена возможность детализировать предшоковую стадию, которая может состоять из двух фаз: форшоковой и затишья. В пределах БРЗ примером отображения подобного режима выделения сейсмической энергии в очаговой области готовящегося землетрясения могут быть следующие события: Муяканское 11.11.1962 г.,  $M = 6.36$ ; Южно-Муйское 13.11.1995 г.,  $M = 6.1$ ; Южно-Байкальское 25.02.1999 г.,  $M = 6.0$ ; Олёнминское 10.11.2005 г.,  $M = 6.0$ ; Култукское 28.08.2008 г.,  $M = 6.3$  и многие другие. Выявлены численные значения длительности каждой фазы перед подготовкой землетрясения определенного энергетического класса и численные зависимости [Пономарёва, 2017]. Для дальнейшего совершенствования методов средне- и долгосрочного прогноза землетрясений применительно к геодинамическим условиям БРЗ проводилось изучение механизмов возникновения наблюдаемого двухфазного сейсмического режима предподготовки землетрясений средствами физического моделирования на природном объекте. Для изучения контактного взаимодействия неровностей в зоне скольжения была спроектирована бетонная 625 кг плита, которая под действием собственного веса скользила по наклонной рифленой поверхности одного из сегментов Ангарского сейсмоактивного разлома на полигоне в п. Листвянка в районе юго-западного побережья Байкала. В момент скольжения плиты и ее надвигания на естественные неровности, её скорость снижалась, иногда до полной остановки, после чего через короткие промежутки времени происходил внезапный срыв с последующим ускорением движения. Контактное взаимодействие плиты и неровностей сопровождалось формированием источников генерации сейсмических колебаний, которые фиксировались сейсмостанциями и деформометрами. Выяснилось, что чем крупнее преодолеваемая неровность, тем интенсивнее контактное взаимодействие и возникновение больших по амплитуде сейсмических импульсов в момент срыва. В зависимости от прочностного состояния неровностей на разломе, сейсмодатчики фиксировали фазы, характерные выявленному сейсмическому циклу в процессе подготовки землетрясения. Сейсмические колебания, наблюдавшиеся при гравитационном спуске платформы, сравнимы с проявлением двух фаз форшоковой стадии: фазы активизации излучения импульсов и фазы затишья перед наступлением срыва в виде шока. Резкий срыв с препятствия и высокоскоростной переход потенциальной энергии в кинетическую рассматривались как аналоги шока с последующим затуханием сейсмоакустической эмиссии в виде афтершоков. Также проводилось детальное изучение стадий формирования сейсмоактивных процессов разрушения Байкальского ледяного покрова [Ружич, Псахье ..... Пономарёва, 2014]. Байкальский лед и массив горных пород имеют аналогичные реологические свойства. При визуальном исследовании ледяного покрова установлено, что возникающие при деформировании ледовых полей разномасштабные трещины, способны излучать упругие

волновые колебания в виде ледовых ударов, сопоставимых со слабыми тектоническими землетрясениями. Сейсмометрическая и деформометрическая аппаратура позволила выяснить следующее. Перед ледовым ударом в виде шока, как и перед землетрясением, на фоне ускоренного крипа в разрывах и возрастания сейсмоакустической эмиссии, возникают две характерные фазы: форшоковой активизации и сейсмического затишья. Также отмечалось, что начало подвижки, приурочено к высоконапряженным сегментам трещины, где есть крупные неровности или места пересечения трещин. На основе экспериментов сделан следующий вывод: подготовка быстрого смещения в виде шока во многих случаях в пределах БРЗ предваряется двумя фазами: форшоков и затишья. Рассмотренная двухфазная феноменологическая модель стадии предподготовки землетрясений становится экспериментально обоснованной, что важно для прогноза мест подготовки землетрясений в БРЗ и в других сейсмоопасных регионах, где наблюдаются двухфазные признаки надвигающейся подготовки землетрясений.

---

## **АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКИХ И ИНФРАЗВУКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ПАДЕНИЯ МЕТЕОРИТА ОЗЕРКИ**

**Попова О.П., Рыбнов Ю.С., Харламов В.М., Глазачев Д.О.**

o9055610006@gmail.com

ИДГ РАН, Москва, Россия

Суперболиды (метеоры ярче -17 звездной величины) наблюдаются примерно 10–30 раз в год по всему земному шару, то есть являются редкими событиями. Большинство наблюдательных данных о суперболидах, которые дают возможность оценить энергию и массу метеороидов, получены в результате оптических наблюдений датчиками спутников правительства США (USG). Для анализа доступна только ограниченная информация (главным образом, энергия в излучении, координаты и высота максимального энерговыделения и, для небольшой части событий, скорость входа). Запись инфразвуковых сигналов является еще одним инструментальным методом регистрации суперболидов, который дает возможность оценить координаты события и энергию источника. Комбинация различных методов наблюдений позволяет получить более достоверные оценки. Оптические наблюдения суперболида в Липецкой области (21 июня 2018 г.; 01:16:20 UT) включают спутниковые наблюдения (UGS) и случайные видеозаписи. Анализ случайных видеозаписей дал возможность оценить световую кривую болида. Инфразвуковые сигналы болида были зарегистрированы в нескольких пунктах, в том числе в Центре геофизического мониторинга, и Геофизической обсерватории в «Михнево» ИДГ РАН, на временном пункте наблюдений в Курской области и на нескольких станциях СТВТО. Кроме того, были найдены фрагменты метеоритов – около сотни фрагментов с суммарной массой более 6,5 кг. Метеорит классифицирован как обыкновенный хондрит L6. Анализ наблюдательных данных дает возможность оценить энергию болида как 2.8–3.5 кт ТНТ, точность определения положения источника составляет примерно  $\pm 10$  км по спутниковым данным, и  $\pm 20$ –50 км по инфразвуку.

## **ТРИГГЕРНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ УНЧ ВОЛН ТИПА IPDP (ЭФФЕКТ ВИНОГРАДОВОЙ-МАЛЬЦЕВОЙ)**

*<sup>1</sup>Потапов А.С.,<sup>2</sup>Довбня Б.В.,<sup>2</sup>Кайн Б.И.,<sup>3</sup>Гульельми А.В.*  
guglielmi@mail.ru

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Геофизическая обсерватория Борок ИФЗ РАН, Борок Ярославской обл., Россия

<sup>3</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

Эффект Виноградовой–Мальцевой обнаружен отечественными геомагнитологами в 1971 году. Он состоит в том, что после импульсной инжекции энергичных протонов из хвоста магнитосферы в область замкнутых магнитных оболочек возбуждаются частотно-модулированные колебания убывающего периода (Irregular Pulsations of Diminishing Period) IPDP (0.1–5 Гц). Пульсации генерируются таким образом, что в вечернем секторе магнитосферы наблюдается азимутальное движение источника колебаний на данной фиксированной частоте с востока на запад. Представляемая работа посвящена изучению эффекта западного дрейфа частоты IPDP по результатам синхронного наблюдения колебаний в обсерваториях Монды и Борок, разнесенных по геомагнитной долготе на 60 градусов. Наш интерес мотивирован, во-первых, тем, что IPDP относятся к классу триггерных явлений. Во-вторых, интерпретация частотной модуляции IPDP и, в особенности, интерпретация эффекта Виноградовой–Мальцевой дает возможность проникнуть в сущность целого комплекса физических процессов, сопровождающих зарождение и эволюцию геомагнитных бурь. Мы продемонстрируем анализируемый эффект на новом материале наблюдений, обсудим проблематику возбуждения и распространения IPDP, и укажем пути использования IPDP для диагностики магнитосферы и для прогноза космической погоды. В частности, мы обратим внимание на то важное обстоятельство, что наблюдаемые свойства IPDP, по-видимому, содержат полезную информацию о силе и возможной продолжительности геомагнитной бури.

*Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ (№ 19-05-00574), Программы № 28 Президиума РАН, а также программ государственных заданий ИФЗ РАН (№ 0144-2014-00116) и ИСЗФ СО РАН (ФНИ II.16).*

---

## **АНАЛИЗ УСЛОВИЙ АКТИВИЗАЦИИ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОЯВЛЕНИЯ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ НА ПОДЗЕМНЫХ РУДНИКАХ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО РЕГИОНА**

*Рассказов И.Ю., Луговой В.А., Цой Д.И., Сидляр А.В.*

e-mail: rasskazov@igd.khv.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, Хабаровск, Россия

Интенсивная разработка месторождений, рост глубины, объемов и темпов добычи полезных ископаемых приводят к активизации геодинамических процессов в районах ведения крупномасштабных горных работ. На подземных рудниках дальнегорского и стрельцовского рудных районов Дальнего Востока такая активизация сопровождается техногенной (шахтной) сейсмичностью и другими, часто разрушительными, геодинамическими явлениями. Здесь зарегистрирован весь спектр динамических проявлений горного давления вплоть до сильных с тяжелыми последствиями горных и горно-тектонических ударов. В массивах удароопасных месторождений региона действуют неравнокомпонентные поля напряжений, в которых горизонтальные (обусловленных действием тектонических сил) сжимающие напряжения в 2–2,5 и более раз превышают вертикальные (гравитационные).

Это во многом определяется геодинамической позицией месторождений в пределах тектонически активной Амурской плиты, характеризующейся высокой структурной неоднородностью, тектонической раздробленностью и наличием областей повышенных напряжений. На Николаевском полиметаллическом месторождении, месторождении урановых руд Антей и ряде других, на которых горные работы достигли глубин 700–800 м и более, геодинамические процессы в природно-техногенном поле напряжений протекают в форме перестройки и самоорганизации блочного массива горных пород и сопровождаются смещениями и подвижками вдоль тектонических нарушений различного масштабного уровня, выделением значительной упругой энергии и проявлением техногенной сейсмичности. По результатам комплексного геомеханического мониторинга установлено влияние сейсмических волн от технологических взрывов и удаленных землетрясений на деформационное поле нарушенного горными работами массива горных пород, в результате которого более чем в 2,5 раза увеличивается количество сейсмоакустических импульсов в зоне опорного давления с одновременным ростом их энергии. Сейсмические волны выступают в роли триггера и инициируют процесс перераспределения напряжений в блочном массиве горных пород и его структурную перестройку. Примером может служить землетрясение 25 марта 2016 г. магнитудой 4 балла на побережье Японского моря в 30 км от Николаевского месторождения, которое спровоцировало сильное геодинамическое явление, вызвавшее разрушение горных выработок на 4 горизонтах подземного рудника.

---

## ГЕОМЕХАНИКА И ТЕКТОНОФИЗИКА О СОСТОЯНИИ РАЗЛОМА ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ

**Ребецкий Ю.Л.**

reb@ifz.ru

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

С позиции тектонофизики рассматривается проблема механизма возникновения мега-землетрясений. Показано, что данные, полученные методами тектонофизики о магнитудах естественных напряжений в регионах с сильнейшими землетрясениями XXI века, являются ключевыми в главной дискуссии XX века по проблеме прогноза катастрофических землетрясений и, в частности, в ответе на вопрос «Если большое землетрясение происходит, когда напряжение превышает прочность горных пород, то почему небольшие землетрясения происходят над сейсмогенной зоной постоянно?» [1]. Выполнен анализ состояния в области прогноза землетрясений и современных взглядов геомеханики на зарождение очагов сильных землетрясений. В рамках теории трения, зависящего от Rate&State [2; 3], с 90-х годов в работах Mogu, Rice, Rubin, Reches, Uenishi и др. активно исследована возможность трансформации медленного скольжения в динамическое (сейсмические события) за счет падения прочности в процессе асейсмического скольжения. Рассматривалась возможность разрушения протяженного «запертого» участка разлома в зонах субдукции. Было установлено, что зона асперити не может быть разрушена без предварительного снижения прочности. В ней начинает формироваться локализованный участок асейсмического скольжения, медленно увеличиваясь в размерах. Затем за короткое время по сравнению с сейсмическим скольжением происходит переход от очень медленных скоростей скольжения к сейсмическим [4; 5]. Длительность фазы постепенного укоренного скольжения может занимать достаточно продолжительное время, т.к. предельный уровень смещений может достигать 20–30% от сейсмических. Таким образом, за определенное время

до землетрясения шероховатость превращается в его оппозицию – зону асейсмического скольжения со сниженным уровнем напряжений. Полученные результаты тектонофизической инверсии напряжений определяют основную площадь очага мега-землетрясения как протяженную область низких и средних напряжений, что соответствует современным физическим представлениям, указывающим на то, что очаг землетрясения зависит от скорости и состояния теории трения. В реальных породах процессы снижения прочности из-за возрастающего асейсмического смещения могут занимать годы, многие десятилетия, а может быть и столетия. Для наблюдателя, который живет на заключительном этапе подготовки землетрясения, это фактически означает, что сильные землетрясения в зонах субдукции не связаны с асперити, а с тем участком, где прочность разрушения снижается на большой площади. Результаты анализа напряжений в очагах сильнейших землетрясений 21 века позволили наполнить физическим смыслом термин «метастабильное состояние» разломов, пришедший в сейсмологию из физики фазовых состояний. Метастабильному этапу предшествует устойчивое состояние, для которого эффективные напряжения имеют большие вариации значений. Переход к нестабильному состоянию определяется процессами в зоне нуклеации (зарождения) землетрясения и требует дополнительных исследований как в лабораторном эксперименте, так и при проведении инверсии напряжений для землетрясений с малыми. Тектонофизический анализ природных напряжений показывает, что зарождение мега-землетрясения может происходить как от границы очага, так и внутри этой границы. В обоих случаях этот небольшой участок зарождения землетрясения должен быть зоной повышенного напряжения.

*Работа выполнена в рамках Госзадания ИФЗ РАН, а также при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-55-53025 ГФЕН\_а).*

#### Литература

1. Kagan, Y.Y., 1997. Are earthquakes predictable. *Geophys.J.* 131, 505–525.
2. Dieterich, J., 1972. Time-dependence of rock friction. *J.Geophys.Res.* 77, 3690–3697.
3. Ruina, A., 1983. Slip instability and state variable friction laws. *J.Geophys.Res.* 88, 10 359–10 370.
4. Abercrombie, R.E., Rice, J.R., 2005. Can observations of earthquake scaling constrain slip weakening? *Geophys.J.Int.* 162, 406–424.
5. Rice, J.R., Uenishi, K., 2002. Slip development and instability on a heterogeneously loaded fault with power-law slip-weakening, *EOS, Trans.Am. geophys. Un. Fall\_Meeting\_Suppl.* 83(47), abstract S61E-06.

---

#### ВЫЗВАННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ ПРИ ДОБЫЧЕ НЕФТИ И ГАЗА – ОБЗОР

<sup>1,4,5</sup>Родкин М.В.,<sup>2,3</sup>Нго Т.Л.,<sup>4</sup>Рукавинникова Т.А.,<sup>2,3</sup>Фунг Тхи Т.Х.

rodkin@mitp.ru

<sup>1</sup>Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Геофизический институт Вьетнамской Академии наук и технологий Вьетнама, Ханой, Вьетнам

<sup>3</sup>Высший Университет Науки и Технологии Вьетнамской Академии наук и технологий, Ханой, Вьетнам

<sup>4</sup>Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>5</sup>Институт Морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

В настоящее время около 10% мировой добычи нефти приходится на долю США. Из них более половины составляет сланцевая нефть, добыча которой растет

особенно быстро. Себестоимость сланцевой нефти в настоящее время в разы пре-  
восходит себестоимость нефти стран Персидского залива и заметно выше средней  
себестоимости нефти по России. Но технология добычи сланцевой нефти допуска-  
ет возможность быстрых прекращений и восстановлений добычи, что позволяет  
подстраивать уровень добычи к текущим ценам на нефть. Все это дает основа-  
ния говорить о кардинальном изменении ситуации на рынке УВ и о начале эры  
сланцевой нефти. Такому развитию может помешать, однако, рост сейсмичности,  
вызванной добычей сланцевой нефти. В статье рассматриваются два аспекта этой  
проблемы: чисто сейсмологический – данные о характере вызванной сейсмично-  
сти, и проблема практических мер и правил, принимаемых в разных странах для  
предотвращения вызванной сейсмичности. В рамках первого аспекта проблемы  
обсуждаются примеры возможной связи сейсмичности и нефтедобычи. На насто-  
ящий момент наличие эффекта воздействия режима нефтедобычи на локальную  
сейсмичность может считаться установленным. Масштабы этого воздействия и  
величины возможных вызванных землетрясений остаются, однако, не ясными.  
Приводятся конкретные примеры предположительно вызванной сейсмичности  
на опыте разных стран и для разных сейсмотектонических условий. Кроме обзо-  
ра данных по США и Канаде рассматриваются примеры наличия или отсутствия  
вызванной сейсмичности для случаев северо-восточного Сахалина и гигантского  
месторождения Белый Тигр на шельфе Вьетнама. Примеры указывают на возмож-  
ность довольно слабой пространственно-временной корреляции сейсмичности с  
режимом воздействия на недра, при том, однако, что техногенный характер сей-  
смичности представляется весьма вероятным. В плане обсуждения мер по уменьше-  
нию риска потерь от вызванной сейсмичности рассматривается опыт ряда стран:  
Нидерландов, Великобритании, США. Вполне ожидаемо, что, если будет доказана  
связь сейсмичности с добычей нефти и землетрясения окажутся достаточно раз-  
рушительными, то выплата штрафов и различного рода ограничения могут сделать  
добычу сланцевой нефти нерентабельной. Даже и без существенных страховых  
выплат добыча сланцевой нефти может оказаться существенно блокированной  
различного рода ограничениями, связанными с опасениями развития вызванной  
сейсмичности. В разных странах вводятся весьма строгие и резко отличающиеся  
требования по мониторингу сейсмичности и прекращению воздействия на недра  
уже при слабых или даже очень слабых вызванных землетрясениях. Можно за-  
ключить, что факторы, определяющие развитие вызванной сейсмичности, остают-  
ся неясными, а требования по контролю вызванной сейсмичности недостаточно  
научно обоснованными.

---

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОТКЛИКА ИОНОСФЕРЫ НА КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ ПРИРОДНЫЕ СОБЫТИЯ И ЯВЛЕНИЯ МЕТОДОМ ОНЧ/НЧ ПРОСВЕЧИВАНИЯ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ

<sup>1</sup>Рожной А.А., <sup>1</sup>Соловьева М.С., <sup>2</sup>Левин Б.В., <sup>2</sup>Шевченко Г.В.,

<sup>2</sup>Лоскутов А.В., <sup>3</sup>Чебров Д.В., <sup>3</sup>Копылова Г.Н.

rozhnoi@rambler.ru

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

<sup>3</sup>Камчатский филиал геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

В данной работе представлен обзор эффектов в ионосфере, вызванных явлениями космической погоды (геомагнитными бурями, рентгеновскими и протонными

вспышками, потоками релятивистских электронов), а также природными катастрофами в литосфере (землетрясениями и извержениями вулканов), гидросфере (распространением волн цунами) и атмосфере (планетарными волнами, изменениями атмосферных характеристик, циклонами и тайфунами). Для исследования этих процессов и явлений используются измерения очень- и низкочастотных (ОНЧ/НЧ) сигналов, полученных на сети принимающих станций. Анализируются электромагнитные сигналы в узкой полосе частот от наземных навигационных передатчиков и передатчиков службы времени, которые размещены по всему земному шару. Такие сигналы отражаются от границы между атмосферой и ионосферой и они чувствительны к возмущениям в нижней ионосфере. В настоящее время наша сеть состоит из одиннадцати приемников, что дает нам возможность контролировать высоко-сейсмоактивные регионы Дальнего Востока и Альпийско-Гималайского пояса. Представлены основные результаты выявленных ионосферных возмущений различной природы, полученные при зондировании нижней ионосферы ОНЧ/НЧ сигналами. Приводятся как возмущения в сигналах, наблюдаемых в отдельных случаях, так и результаты статистического, корреляционного и спектрального анализа. Недавнее развитие ОНЧ/НЧ наблюдательных систем в Европе, Азии и Северной Америке может повысить точность и надежность информации о свойствах и положении возмущенной области в ионосфере и, таким образом, способствовать как фундаментальным ионосферным исследованиям, так и их практическому применению. Использование данных с сети наблюдений дает возможность различать локальные ОНЧ/НЧ возмущения и глобальные аномалии, вызванные космической погодой.

---

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ  
И РАЗРУШЕНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД КАРЬЕРА «ЖЕЛЕЗНЫЙ»  
(АО «КОВДОРСКИЙ ГОК») ПО ДАННЫМ НАЗЕМНОГО РАДАРА IBIS FM**

<sup>1</sup>*Розанов И.Ю.,* <sup>2</sup>*Завьялов А.А.*

*ivan-rozanov@yandex.ru*

<sup>1</sup>Горный институт – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия

<sup>2</sup>АО Ковдорский ГОК, Ковдор, Россия

В связи с увеличением плановых размеров и глубины карьеров все большую актуальность приобретает мониторинг устойчивости бортов и уступов карьеров. Под мониторингом устойчивости бортов карьера подразумевается проведение различного рода натурных измерений для сбора информации о текущем состоянии массива горных пород и прогнозирования его дальнейшего состояния, в том числе и момента перехода в предельное состояние. Прогноз состояния массива невозможно выполнять, не определив значения предельных параметров деформирования, превышение которых приводит к разрушению пород, слагающих борт карьера. Широко распространенным способом определения предельных параметров деформирования является выявление эмпирических закономерностей, полученных при анализе результатов полевых наблюдений. Самыми распространенными методами наблюдений за состоянием массива горных пород при открытой разработке месторождений являются геодезические методы. На сегодняшний день для целей мониторинга достаточно широко применяются GPS-измерения, различные тахеометры и светодальномеры, нивелиры, лазерные сканеры, интерферометрические радары. Основным преимуществом радаров по сравнению с другими

методами мониторинга является их способность контролировать состояние массива 24 часа в сутки в любую погоду, невзирая на осадки (снег, дождь, град, туман) или плохую видимость в карьере, вызванную пылью, выхлопными газами и т.п. Большим плюсом, также является и высокая точность измерения расстояний (0.1 мм). Несмотря на то, что в зарубежной практике радары применяются уже давно (с 2001 г.) в России первый интерферометрический радар появился в 2014 году и был установлен на западном борту карьера «Железный» АО «Ковдорский ГОК». За 5 лет работы радара был накоплен значительный статистический материал и зафиксировано несколько обрушений различного объема. Все эти данные позволили выявить закономерности развития процесса деформирования массива, определить предельные параметры и разработать временную инструкцию по выполнению наблюдений и обработке результатов измерений деформаций уступов карьера с помощью радара IBIS FM. В инструкции излагается порядок действий для обнаружения участков массива с потенциально опасными деформациями, а также мероприятие, обеспечивающие эффективную работу данной технологии, и действия персонала при подаче сигналов тревоги.

---

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ ГЛУБИННЫХ ПАЛЕОСЕЙСМОДИСЛОКАЦИЙ В ЭКСГУМИРОВАННЫХ РАЗЛОМАХ (НА ПРИМЕРЕ КРАЕВОГО ШВА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ)**

*Ружич В.В.*

*ruzhich@crust.irk.ru*

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

До настоящего времени представления о глубинном строении землетрясений остаются весьма упрощенными и неоднозначными, поскольку зарождение и формирование их очагов происходит на недоступных глубинах в недрах литосфера. Такая ситуация затрудняет выяснение условий подготовки, разработку моделей очагов и эффективных способов смягчения инженерно-сейсмического риска. В данном сообщении рассматриваются примеры мультидисциплинарного изучения глубинных палеосейсмодислокаций в зоне выведенного на поверхность (экстремированного) Приморского сегмента краевого шва Сибирской платформы, проведенного при участии со специалистами Института динамики геосфер РАН. Данный сегмент расположен на северо-западном борту побережье Байкальской рифтовой впадины. Использовался комплексный подход, в котором сочетались геолого-структурные методы с методами экспериментальной физики, геомеханики, численного моделирования [Ружич, Кочарян, 2017]. Для выявления глубинных древних косейсмических разрывов (палеосейсмодислокаций) наряду со структурным изучением акцент был сделан на выявление петрохимических показателей характерных признаков по тектонитам, взятым из зон древних разрывных нарушений: псевдотахилитам и зеркалам скольжения. Данные признаки считаются как надежные свидетельства проявления высокоскоростных смещений в зонах разломов [Соболев, Веттегрен, Ружич и др., 2016]. Известные минералы, рассматриваемые как «геотермометры» и «геобарометры», использовались для оценок температуры и давлений, при которых происходили косейсмические смещения в разрывных нарушениях [Ружич, Кочарян, Травин, Савельева, 2018]. Для оценки абсолютного возраста возникновения древних косейсмических разрывов использовался метод 40Ar/39Ar, а в качестве минерала «геохронометра» был взят турмалин из зеркала скольжения, который обладает высокой устойчивостью к наложенным термическим воздействиям в последующие периоды. Полученные значения абсолютного

возраста одного из глубинных косейсмических разрывов с зеркалами скольжения составила  $673 \pm 5$  млн. Это означает, что подвижка соответствуют одному из этапов сейсмотектонической активизации в неопротерозойскую эру на заключительной стадии распада суперконтинента Родиния. Другая абсолютная датировка возраста смещений по мусковиту, взятому из компрессионной трещины, составила  $415.4 \pm 4.1$  млн лет. Она предположительно согласуется с  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$  датировками синтектонических слюд, возникших на среднепалеозойском этапе проявления сдвиговых деформаций в зоне краевого шва [Ружич, Кочарян, Травин и др., 2018]. Если принять, что наиболее ожидаемый геотермический градиент в неопротерозое составлял порядка  $30$  о/км, тогда глубины проявления косейсмических разрывов примерно соответствовали уровням порядка  $18\text{--}12$  км, соответственно в неопротерозойский и среднепалеозойский этапы тектонической активизации краевого шва. На приведенных примерах показаны возможности и перспективы дальнейшей разработки мультидисциплинарного подхода к изучению условий подготовки очагов землетрясений на сейсмофокальном уровне земной коры континентов. Он позволяет детально изучать строение очагов древних землетрясений, а также последствия флюидного насыщения зон сейсмоактивных разломов, сохранившихся после процессов их минерального залечивания на разных стадиях зарождения очагов палеоземлетрясений. Детальное петрохимическое изучение образцов горных пород из зон экзгумированных глубинных палеосейсмодислокаций открывает возможности восстанавливать РТ-условия и флюидное насыщение, влияющие на изменение фрикционных параметров скольжения при переходе от асейсмического крипа в режим косейсмического скольжения. Это актуально для создания новых адекватных моделей очагов землетрясений, совершенствования методов их долгосрочного прогноза, а также для разработки способов снижения инженерно-сейсмического риска от губительных актов динамического разрушения природного и антропогенного происхождений. При рассмотренном изучении глубинных палеосейсмогенных разрывов расширяются также достоинства палеосейсмологического метода для его реализации в трехмерном измерении.

---

## ОБЪЯСНЕНИЕ ПРОЯВЛЕНИЙ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ В СЕЙСМОГЕОДИНАМИКЕ

<sup>1</sup>*Ружич В.В.*, <sup>2</sup>*Смольков Г.Я.*, <sup>1</sup>*Левина Е.А.*

e-mail: ruzhich@crust.irk.ru

<sup>1</sup>Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

Анализ состояния исследований природы солнечно-земных связей (СЗС) свидетельствуют о том, что солнечно-земная физика находится на поисковой стадии [Смольков, Баркин, 2014; 2016]. Появление регистрации глобальных процессов и событий во всех оболочках Земли способствует пониманию и объяснению механизмов, цикличности, синхронности, планетарной асимметрии, нестабильности суточного вращения Земли, геотектоники и других проявлений солнечно-земных связей во всех внутренних и внешних оболочках Земли [Баркин, 2002; Smolkov, Barkin, 2016]. Появилась осмысливаемая новая информация об эндогенных условиях взаимодействия оболочек нашей планеты, при которых нередко возникают локализованные магматические расплавы, флюидные системы и механические неустойчивости в разрывных нарушениях. Последние при накоплении до критического состояния могут активизироваться триггерными механизмами. Обнаруженный системный дрейф центра масс Земли в область северного полушария

со средней скоростью 27 км/год позволяет объяснить полярную асимметрию, массоперенос, деформации литосферной оболочки Земли, изменения ее формы, силы тяжести, уровней океанов и других планетарных явлений. В проявлениях эндогенной активности Земли природа СЗС связана не просто с гравитационной, а с гравитационно-тепловой конвекцией [Баркин, 2002]. Объяснение природы СЗС с позиций трансформации гравитационного воздействия на оболочки Земли гравитационно-тепловым механизмом предложено с учетом известных представлений об определяющей роли процессов пульсационной дегазации и флюидной геодинамики в мантийной и литосферной геосферах [Летников, 1996; 2001]. При формировании планетарной флюидной системы дренирования мантии вследствие гравитационно-теплового преобразования горных пород проявляются известные процессы геофлюидодинамики [Родкин, Рундквист, 2017] в результате высокоскоростного пульсационного перемещения флюидов к земной поверхности через зоны разломов, оказывая модулирующее влияние на режим сейсмической активности. Суммарная мощность гравитационных воздействий Солнечной системы на литосферу в зонах флюидонасыщенных разломов достаточна для образования фрикционных неустойчивостей, триггерно инициирующих сейсмические отклики различного энергетического уровня. Скачкообразные проявления СЗС обусловлены воздействием на Солнечную систему в целом со стороны неоднородной межзвездной среды. Приемлемые объяснения многогранной природы фиксируемых проявлений наблюдаемой периодичности в сейсмогеодинамике успешнее всего получаются благодаря междисциплинарному системному изучению СЗС с учетом всех внешних факторов воздействия на Землю.

---

## **СКАЧКИ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И АТМОСФЕРНЫХ ТОКОВ ПО ДАННЫМ МНОГОЛЕТНИХ НАБЛЮДЕНИЙ В ГФО «МИХНЕВО»**

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

*vlad\_fisher@inbox.ru*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

В ГФО «Михнево» более 5 лет работает комплекс измерений напряженности электрического поля и вертикального атмосферного тока. Стенд работает практически в непрерывном режиме. Диапазон измеряемых параметров: напряженность электрического поля  $\pm(1\text{--}3)\text{--}5000$  В/м, атмосферный ток  $\pm(0.1\text{--}80)$  пА/м<sup>2</sup>, частота дискредитации – 10–20 Гц. В спокойных гелиофизических условиях в течение суток ток следует за величиной напряженности поля, а запись поля близка к известной кривой Карнеги. Характерные величины напряженности поля 100–300 В/м, а токов 1–3 пА/м<sup>2</sup>. Датчики тока фиксируют одновременно ток проводимости (примерно пропорционален величине напряженности электрического поля) и ток смещения пропорциональный скорости изменения поля. В средней полосе России дней «хорошей погоды» бывает 20–40 в году. В остальные дни метеорологические условия вызывают искажения результатов электрофизических наблюдений. Появление облаков практически всегда приводит к изменению напряженности электрического тока и атмосферных токов. Сравнительно медленное нарастание или уменьшение напряженности электрического поля (характерное время изменения поля – несколько часов приводит к примерно пропорциональному изменению атмосферного тока). Это значит, что мы видим в основном ток проводимости, который пропорционален напряженности электрического поля. Приближение мощного

облачного фронта практически всегда приводит сильному изменению напряженности электрического поля (характерное время нарастания поля  $\sim 1$  часа), типичная величина изменения поля сотни и тысячи В/м. Токи при этом увеличиваются и часто превышают 80 пА/м<sup>2</sup> – верхний предел измерения. Во время приближения грозы на записях напряженности поля видны отдельные молниевые разряды. За время наблюдений фиксировались и зимние грозы. В ряде случаев сильные изменения электрического поля наблюдаются и в отсутствии облачности.

---

## СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

ЛИПЕЦКОГО БОЛИДА 21.06.2018 г.

*Рыбнов Ю., Варыпаев А., Волосов С., Нестёркина М., Константиновская Н., Харламов В.*

avalex89@gmail.com

Федеральное государственное бюджетное учреждение институт динамики геосфер РАН, Москва, Россия

21 июня 2018 г.  $\approx$  в 01:16 по UT, в районе с. Озерки Липецкой области наблюдалось падение метеороида, яркий след которого был виден на большое расстояние. Движение таких метеороидов создает сильные акустические возмущения в атмосфере, которые могут возбуждать сейсмические колебания в земной коре. Сейсмоакустическим комплексом ИДГ РАН (ГФО «Михнево») были зарегистрированы акустические колебания и сопутствующие им сейсмические от данного события. Анализ комплексных натурных наблюдений показал, что наблюдаются одновременные сейсмические и акустические колебания. Время их регистрации равно  $\approx 01:30:46$  по UT. Установлено, что сейсмические колебания были возбуждены инфразвуковой волной от болида, которая распространялась в стратосферном волноводе. В настоящей работе на основе результатов акустических наблюдений были оценены координаты источника ( $N \approx 52,4$ ,  $E \approx 37,8$ ). Наблюдается хорошее совпадение с данными по координатам, представленными NASA, где оценка проводилась по максимальной яркости свечения ( $N \approx 52,8$ ,  $E \approx 38,1$ ). Погрешность оценки не превышает  $\approx 40$  км. Пеленг на источник по сейсмическим наблюдениям был равен  $\approx 174$ , а по акустическим  $\approx 178$  градусам. Ошибка пеленга не превышает  $\approx 4$  градуса. Оценка пеленга по координатам источника, представленных NASA, равна  $\approx 174$  градусам и хорошо совпадает с пеленгом, полученным сейсмической группой ГФО «Михнево». По данным инфразвуковых наблюдений и методике, разработанной в ИДГ РАН, была оценена энергия болида, равная  $\approx (1,2 \div 1,3) \times 10^{13}$  Дж. Результаты проведенных исследований, касающиеся амплитудно-частотных характеристик сейсмоакустических сигналов и источников их вызывающих, позволяют расширить представления о механизмах генерации указанных возмущений и их проявлениях в различных геофизических полях.

---

## ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СПЕКТРА ТРАНСПОРТНЫХ ШУМОВ

*<sup>1</sup>Рыбнов Ю.С., <sup>2</sup>Соловьев А.В.*

rybnov.y@mail.ru

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Томский государственный университет, Томск, Россия

Акустический шум является важным экологическим фактором в окружающей среде. В городских условиях акустические шумы характеризуются большим

многообразием источников техногенного происхождения, связанных с деятельностью человека. Наиболее распространенными источниками являются энергетические подстанции, тяжелая строительная техника и движение транспорта. Технологическое, промышленное и социальное развитие населенных пунктов сопровождается ростом шумового загрязнения их окружающей среды. В последнее десятилетие уровень шума в больших городах вырос в 10...15 раз. Влияя на психику человека, он вызывает рассеянность, усталость и другие симптомы. Длительное пребывание под воздействием шума может привести к различным психическим заболеваниям и расстройствам, а также может оказывать влияние на сердечно-сосудистую систему человека. Поэтому в городах остро встает необходимость выявления районов с повышенной шумовой загрязненностью, так как именно в них наиболее часто происходят ДТП и другие аварии на строительных и монтажных работах. Целью данной работы является анализ транспортных шумов урбанизированных территорий. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: анализ спектральных характеристик акустических шумов в городских условиях, картирование территории по спектральным характеристикам акустических шумов, анализ влияния транспортных шумов на общий уровень акустического фона в городе, а также анализ влияния различных режимов работы двигателя на уровень транспортных шумов. Предложена методика построения карты шума города на основе двухпараметрической модели спектра акустических шумов. Описаны факторы, влияющие на формирование акустических шумов транспортного потока. Проведен анализ влияния различных режимов работы двигателя внутреннего сгорания автомобиля на фоновый уровень акустических шумов.

---

## МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ОТКРЫТОЙ ГЕОТЕХНОЛОГИИ

<sup>1</sup>*Рыльникова М.В.,<sup>1</sup>Федотенко В.С.,<sup>2</sup>Матва С.В.,<sup>3</sup>Кокин С.В.*

victorfedotenko@gmail.com

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>ОАО «УК «Кузбассразрезуголь», Кемерово, Россия

<sup>3</sup>ООО «КРУ-Взрывпром», Кемерово, Россия

Анализ изменений, произошедших в открытой геотехнологии за последние 20 лет, выявил существенный рост суммарных объемов извлекаемой горной массы, что очевидным образом определяет необходимость развития технологий, обеспечивающих снижение негативного воздействия открытых горных работ на окружающую среду. В результате переоснащения парка выемочно-погрузочной и горнотранспортной техники значительно возросла единичная мощность применяемого оборудования. Вопреки ожиданиям увеличение емкости ковша экскаватора привело к росту удельного расхода ВВ для обеспечения требуемого объема и качества дробления горных пород, что объясняется особенностями конструкции экскаваторов большой единичной мощности зарубежного производства. В свою очередь рост мощности выемочно-погрузочного и горнотранспортного оборудования определило необходимость повышения интенсивности ведения буровзрывных работ для обеспечения достаточного резерва взорванной горной массы. Также в ходе исследования был установлен устойчивый тренд сокращения расстояния от участков ведения горных работ до населенных пунктов. Проведенный анализ актуализирует

задачу разработки и внедрения инновационных методов и средств ведения взрывных работ, обеспечивающих возможность эффективной подготовки в требуемом объеме горной массы к выемке буровзрывным способом с учетом применения оборудования большой единичной мощности не превышающей допустимых величин негативного воздействия. Также была поставлена цель добиться требуемого качества взрывного дробления горной массы при обеспечении снижения удельного расхода взрывчатых веществ. Для решения поставленной задачи в период с 2013 по 2018 гг. были проведены в условиях филиалов ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» на территории Кемеровской области обширные промышленные испытания, объединенные общей целью, а также единым методическим и программным подходом. За весь период исследования было выполнено более 700 экспериментальных взрывов. Было изучено влияние способов и конструкций забойки и рассредоточения скважин, а также методы и средства снижения интенсивности пылеобразования. В результате были оптимизированы параметры буровзрывных работ, установлены конструкции скважинных затворов и универсальных запирающих устройств, применение которых обеспечивает: (1) снижение удельного расхода ВВ на 9,5–12,3%; (2) возможность кратно увеличить объем породы, одновременно подготавливаемый к выемке буровзрывным способом; (3) снижение сейсмического воздействия на охраняемые объекты; (4) сокращение трудозатрат на выполнение забойки. Экспериментально доказано, что рассредоточение заряда в скважинах с использованием скважинных затворов уменьшает негативное воздействие взрыва на окружающую среду и позволяет снизить удельный расход ВВ на величину до 15,8%, при этом эффект увеличивается с ростом высоты взрываемого уступа. Полученные положительные результаты обеспечили создание научной и методической основы для промышленного внедрения разработанных организационно-технических решений. С 2013 по 2018 годы, благодаря использованию универсальных запирающих устройств (УЗУ), скважинных затворов и придонных компенсаторов ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» удалось добиться фактического снижения массы применяемых взрывчатых веществ относительно базового на 62,8 тыс тонн, что в стоимостном выражении составило более 1 млрд руб.

---

## **ОСОБЕННОСТИ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ НА ГФО «МИХНЕВО» В 24-ОМ ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ**

**Рябова С.А.**

riabovasa@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

Известно, что солнечная активность определяет состояние атмосферы и ионосфера Земли. Динамические процессы на Солнце, такие как солнечные вспышки, корональные выбросы массы, высокоскоростные потоки солнечного ветра, следующие за ударной волной от мощных вспышечных событий или истекающие из корональных дыр, являются источником геомагнитных возмущений на Земле. Данные среднеширотной Геофизической обсерватории «Михнево» ИДГ РАН служат основой рассмотрения геомагнитной активности текущего 11-летнего цикла солнечной активности. Исследование охватывает период времени с 2009 по 2017 гг. – с начала фазы роста 24-ого цикла солнечной активности до наступившей фазы спада 24-ого 11-летнего солнечного цикла. Текущий 24-ый цикл активности – самый слабый солнечный цикл за последние более чем 100 лет. Следующий минимум солнечной активности между циклами 24 и 25 ожидается примерно в 2018–2019 гг. Индекс F10.7 (мощность солнечного излучения, эмитируемая на радиоволне 10,7 см) и

число Вольфа (относительное цюрихское число солнечных пятен) используются для характеристики текущего уровня активности Солнца. В качестве характеристики геомагнитной активности используется геомагнитный индекс К. В работе определены основные периодичности геомагнитной активности. Результаты проведенных исследований указали на то, что геомагнитная активность максимальна в период равноденствий, причем в 24-ом цикле солнечной активности доминирует весенний максимум. Анализ совместных вариаций солнечной и геомагнитной активностей показал сдвиг последней на один год относительно вариаций параметров солнечной активности.

---

## **НЕЛОКАЛЬНЫЕ ВАРИАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ ПРИ ПАДЕНИИ МЕТЕОРИТОВ**

*Рябова С.А., Спивак А.А.*

e-mail: riabovasa@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

С привлечением данных магнитных наблюдений, выполненных на среднеширотных обсерваториях сети INTERMAGNET и Геофизической обсерватории «Михнево» ИДГ РАН анализируется геомагнитный эффект при падении метеоритов в атмосфере Земли. В качестве примеров рассмотрены Витимское (24.09.2002 г.), Челябинское (15.02.2013 г.), Румынское (07.01.2015 г.), Бурятское (25.10.2016 г.), Хакасское (06.12.2016 г.), С.-Петербургское (11.09.2017 г.) и Липецкое (21.06.2018 г.) события. Установлено, что падение космических тел сопровождается ярко выраженными вариациями магнитного поля, причем эффект имеет нелокальный характер и наблюдается на расстояниях до 7000 км от места падения космического тела. Отмечается слабая зависимость амплитуды наведенных геомагнитных вариаций от расстояния до места события. Полученные результаты свидетельствуют о том, что характер рассматриваемого эффекта может отличаться для разных событий: в период падения космических тел наблюдаются изменения магнитного поля как в положительную, так и отрицательную сторону. В отдельных случаях регистрируется знакопеременный характер вариаций. Показано, что пролет и взрыв метеорита оказывают большее влияние на горизонтальную компоненту магнитного поля. Значительные отличия в амплитудах рассматриваемого эффекта для разных событий требуют дальнейшего, более детального изучения рассматриваемого явления с привлечением дополнительной информации. Полученные данные дополняют имеющуюся экспериментальную информацию, расширяют современные представления о механизмах геофизических процессов, сопровождающих падение космических тел на Землю, и создают основу для верификации теоретических и численных моделей, разрабатываемых для описания реакции геосфер на сильные локальные возмущения.

---

## **ГОДОВЫЕ ВАРИАЦИИ АБСОЛЮТНОГО ЗНАЧЕНИЯ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ ПРИЕМНИКОВ ГНСС В ГФО «МИХНЕВО»**

*Ряховский И.А., Гаврилов Б.Г., Ляхов А.Н., Поклад Ю.В., Беккер С.З.*

89167709599@yandex.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

В настоящее время для изучения процессов, происходящих в ионосфере,

активно используются данные глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), таких как ГЛОНАСС, GPS, а также BeiDou, Galileo. Использование фазовых и кодовых измерений двухчастотных приемников ГНСС позволяет получать вариации полного электронного содержания (ПЭС) налуче приемник-спутник. ПЭС является основным параметром, дающим информацию о процессах в ионосфере по данным сигналов ГНСС. В тоже время величина вариаций ПЭС дает в основном качественное представление об изменениях в ионосфере. Поэтому задача восстановления абсолютного значения этой величины является актуальной. Решение этой задачи требует коррекции полученных данных путем учета дифференциальных кодовых задержек в приемо-передающих трактах навигационного канала. Разработанный нами алгоритм позволил получать абсолютное значение ПЭС, скорректированное не только по ДКЗ, но и с учетом получаемых независимым путем данных по высоте максимума электронной концентрации в F2-области ионосферы. Методика была апробирована при анализе возмущений ионосферы, вызванных рентгеновскими вспышками M и X класса. Так же разработанная методика позволила восстановить абсолютное значение ПЭС над Геофизической обсерваторией «Михнево». На основании полученных результатов было построено годовое распределение абсолютного значения ПЭС в различных гелиогеофизических условиях. Полученные результаты хорошо согласуются с данными мировых сетей, таких как Madrigal и MGEX. Дальнейшее развитие исследований предполагает совместное использование результатов восстановления абсолютного значения ПЭС с данными ЛЧМ зондов и данными по распространению СДВ сигналов, что должно позволить получить наиболее полные данные по высотному распределению электронной концентрации в ионосфере в спокойных и возмущенных гелиогеофизических условиях.

---

## **К ВОПРОСУ О СОВРЕМЕННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ ЦЕНТРА И СЕВЕРА РУССКОЙ ПЛИТЫ**

**Санина И.А., Горбунова Э.М., Иванченко Г.Н.,  
Константиновская Н.Л., Нестеркина М.А., Ризниченко О.Ю.**

*irina@idg.chph.ras.ru*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

Начиная с 2004 года малоапертурная группа «Михнево» (МСА «Михнево»), расположенная на территории геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево», ведет непрерывный мониторинг сейсмических событий на территории Восточно-Европейской платформы. Целью создания группы было выявление сейсмических событий природного генезиса на фоне мощной техногенной нагрузки на регион. За время наблюдений МСА «Михнево» зарегистрировано более 15000 сейсмических событий различной природы, основную массу которых составляют промышленные взрывы. Часть месторождений приурочена к различным геологическим структурам, которые могут быть геодинамически активными. Распознавание природы сейсмических событий представляет определенные трудности. За 15-летний период стационарного мониторинга действующей МСА «Михнево» создан банк данных волновых форм сейсмических событий, ассоциированных с постоянно действующими карьерами на основе современных методов анализа экспериментальных данных (метод кросскорреляции волновых форм, вейвлет анализа и др.). Также было зарегистрировано несколько событий, которые по ряду признаков не могут быть ассоциированы с взрывными работами. Природа данных событий

не ясна, так как они могут иметь различный генезис – тектонический, техногенный и техногенно-тектонический. Для выделения тектонически предопределенных событий в дополнение к геофизическим методам интерпретации привлечены геолого-геоморфологические и дистанционные методы исследований участков их локализации. Выделенные события приурочены к структурам фундамента – глубинным разломам, бортам авлакогенов, древним шовным зонам, градиентным зонам. На современном и неотектоническом этапе развития региона активность рассматриваемых структур выражается в рельфе, линеаментном рисунке и особенностях геофизических полей. Проявление техногенных и техногенно-тектонических событий может быть связано с постоянно растущим уровнем антропогенной нагрузки и разработкой различных месторождений с использованием взрывных технологий.

*Исследование выполнено в рамках гос.задания ИДГ РАН (№ 0146-2019-0004) и при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-05-01099).*

---

## **ЗНАЧИМОСТЬ МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ В ПОЗНАНИИ РАЗНОМАСШТАБНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

**Сафонов Ю.Г.**

*safonov@igem.ru*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), Москва, Россия

Накопленное знание по тектонико-геодинамическим закономерностям становления и развития разномасштабных металлогенических геосистем в настоящее время в малой мере используется для решения общей обратной задачи – «восстановления» геодинамико-тектонической истории геосистем. Это относится как к региональным, отчасти даже глобальным геодинамическим процессам, так и к создающим локальные металлогенические таксоны – рудные районы, поля, узлы, месторождения. Опыт автора, в основном по изучению закономерностей образования месторождений золота, урана, частью в многометальных металлогенических провинциях, позволяет рассмотреть различные направления в общей проблеме триггерных эффектов, включая структуры и свойства разломных зон, и тектонических блоков, а также деформационные процессы при отработке руд различного состава в реальных геологических обстановках. При этом в особую проблему выделяются условия и технологии отработки руд глубинного залегания, главным образом на основе данных по золоторудным месторождениям Индии (рудное поле Колар) и ЮАР (золоторудная область бассейна Витватерсранд). Глубина отработки руд Колара составила 3220 м (рудник закрыт в 2010 г.). На единичных рудниках Витватерсранда горные выработки достигли глубины в 3.5 км, рудные тела установлены на глубинах 4.5–5 км. Добыча руд золота здесь, как и в других районах, реализуется в глубинном интервале 2–2.5 км. Общей проблемой в добывче руд глубинного залегания – возрастание с глубиной проявлений породных взрывов (rock bursts). В связи с этим обсуждаются и разрабатываются технологии подземного выщелачивания и другие. В нашей стране только в Норильском районе глубина вскрытия руд достигла 2 км, но проблема горного удара (mountain blow) определилась в угледобывающей отрасли 75 лет назад. В последние десятилетия в этой проблеме всё в большей мере увязываются вопросы динамики массивов и газонасыщенности пород, прежде всего угольных пластов. В определенной мере при этом учитываются разработки газонефтяной геологии. Ассоциация в угольных месторождениях метана и ртути, как и сонахождение ртутных месторождений

и угленосных бассейнов в общих минерагенических провинциях и поясах остаются в поле внимания как металлогенез, так и в исследованиях углеводородного сырья – от прогнозно-поисковой практики до его добычи. Вместе с тем накоплена информация и по другим индикаторным элементам специализированных геосистем, таким как уран и некоторые другие. Нельзя не отметить, что данные по ореолам Hg, U позволяют рассматривать вероятные связи образования месторождений рудного и нерудного сырья с разноглубинными процессами. Проблема триггеров развития этих процессов, их системной организации является общей для металлогенеза и различных видов нерудного сырья. Но исследования в этих направлениях в основном проводятся автономно. Должные контакты, комплексирование устанавливаются, главным образом, на основе инициативы исследователей, а не централизованно. Это относится и к основному предмету исследований – к разработке базовых представлений о геосистемах – о природе их геологическо-минерагенической специализации, геодинамических обстановках, в разномасштабном стерео-генетическом выражении и в определенные временные интервалы.

*Данная работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (№17-05-01167).*

---

## ТРИГГЕРНЫЙ ЭФФЕКТ АСТЕРОИДНОГО УДАРА НА ГРАНИЦЕ ПЕРМИ И ТРИАСА

*Светцов В.В., Шувалов В.В.*

*svetsov07@rambler.ru*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

Причины всех массовых вымираний точно не выяснены и остаются предметом споров. Значительное вымирание биоты может произойти, когда биосфера в условиях длительного стресса подвергается сильным кратковременным воздействиям [1]. Многие исследователи считают, что удар астероида размером 10–20 км является основной причиной массового вымирания на границе мела и палеогена. Высказывалось предположение, что подобные удары могли вызвать и другие массовые вымирания. Для крупнейшего массового вымирания на границе перми и триаса был найден соответствующий ударный кратер – кратер Арагуайнья в Бразилии, диаметром 40 км и возрастом  $254.7 \pm 2.5$  млн лет, что перекрывается с оценками границы пермь-триас. Расчетный диаметр астероида при ударе Арагуайнья составляет около 3 км, что недостаточно для непосредственной причины глобального массового вымирания. Тем не менее, удар может вызвать другие механизмы уничтожения биоты. Удар астероида диаметром 3 км со скоростью 20 км/с вызывает землетрясение магнитудой 9.5–10 [3]. Исследования бассейна Парана, большого кратонного осадочного бассейна, включающего кратер Арагуайнья, обнаружили свидетельства землетрясения, вызванного ударом Арагуайнья. Широкое распространение сейсмитов ограничивается стратиграфическим горизонтом, занимающим самые верхние 10–100 м пермских осадочных пород (группы Пасса Доис). А горизонтальная протяженность области деформаций мягких отложений наблюдается в радиусе около 1000 км от места удара Арагуайнья. Землетрясение, вероятно, сопровождалось большой волной цунами, нагруженной как смытыми осадками, так и выбросами из кратера [4]. Большую часть местной породы составляли горючие сланцы. Было высказано предположение, что прохождение этой волны может вызвать быстрые изменения литостатического давления для горючих сланцев (60–200 м ниже палеоповерхности), что способствовало бы выделению запертого метана из породы богатой органикой [5]. Оценки [5] дают, что в это время

в атмосферу было выброшено около 1600 гигатонн метана, что имело бы значительные климатические последствия. Мы оценили еще один триггерный механизм удара – пожары, инициируемые излучением ударного плюма. Численное моделирование удара астероида диаметром 3 км с расчетами потоков излучения на земле [6] показывает, что зажигание легко воспламеняющихся материалов, таких как сухая трава, может начаться в радиусе 2000 км от места удара. Горение летучих субстанций горючих сланцев может усугубить ситуацию, приводя к увеличению количества углекислого газа в атмосфере.

*Работа выполнена в рамках программы РАН (проект № 0146-2018-0005).*

#### Литература:

1. Arens N.C., West I.D. (2008) Paleobiology 34: 456–71.
2. Tohver E. et al. (2012) Geochimica et Cosmochimica Acta 86: 214–227.
3. Khazins V.M. et al. (2018) Solar System Research 52: 547–556.
4. Tohver E. et al. (2018) GSA bulletin 130 (7–8): 1099–1120.
5. Tohver E. et al. (2013) Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 387: 66–75.
6. Svetsov V., Shuvalov V. (2019) Meteoritics & Planetary Science 54: 126–141.

---

## КРИТИЧЕСКОЕ ЗАМЕДЛЕНИЕ ПРИ ПРИБЛИЖЕНИИ СИСТЕМЫ К КАТАСТРОФЕ

**Сергеев В.Н.**

victnsergeev@gmail.com

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

Критическое замедление при приближении к катастрофе – это явление имеющее универсальный характер [1–3], присущее разнообразным по природе системам, эволюционирующими к катастрофическому изменению их состояния. Суть этого явления заключается в том, что по мере приближения системы к катастрофе в ней (за счет случайных воздействий, всегда присутствующих в реальной системе) возбуждаются собственные колебания определяющих параметров с уменьшающейся с приближением к катастрофическому порогу частотой. В математической теории катастроф [4] «критическое замедление» называется одним из «флагов» катастрофы, т.е. событием ей предшествующим. Возбуждаемые собственные колебания определяющих параметров с уменьшающейся частотой по мере приближения системы к катастрофическому порогу могут служить не только предвестником, но и триггером катастрофы [5]. Особенно это характерно для активных систем (систем в которых диссиляция компенсируется накачкой) [3], в которых при приближении к катастрофе увеличивается амплитуда возбуждаемых колебаний. В этом случае катастрофический порог достигается раньше, чем в отсутствие колебаний определяющих параметров.

#### Литература

1. Дубровский В.А., Сергеев В.Н. Универсальный предвестник геомеханических катастроф // Докл. РАН. 2004. Т. 395. № 4. С. 479–481.
2. Scheffer M., et al. Anticipating critical transitions // Science. 2012. V. 338. P. 344–348.
3. Руманов Э.Н. Критические явления вдали от равновесия // УФН. 2013. Т. 183. № 1. С. 103–112.
4. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф. Т.1. М: Мир. 1984. 350 с.
5. Гульельми А.В. Форшоки и афтершоки сильных землетрясений в свете теории катастроф // УФН. 2015. Т. 185. № 4. С. 415–429.

## **ПРИНЦИП НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРОГНОЗА ТРЕХ ПАРАМЕТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ**

*Сибгатулин В.Г., Кабанов А.А.*

*es\_gopr@mail.ru*

Институт вычислительных технологий СО РАН – СКТБ «Наука», Красноярск, Россия

Как известно, энергетические процессы в микромире носят вероятностный характер и ограничены фундаментальным понятием квантовой механики – соотношением неопределенности Гейзенберга. Длительное время считалось, что процессы в макромире детерминированы и соотношение неопределенности к ним не применимо. Однако по мере выявления и изучения динамически неустойчивых макросистем накапливается всё больше фактов, свидетельствующих о возможности применения соотношения неопределенности к описанию поведения и некоторых классов макросистем. В частности, энергетические процессы в сейсмических очагах носят нелинейный характер. Успешность различных методик краткосрочного прогноза землетрясений только по сейсмическим каталогам, по нашему мнению, также ограничивается некоторым аналогом принципа неопределенности Гейзенберга. Поэтому, при использовании только сейсмологической информации невозможно достоверно определить (спрогнозировать) сразу три параметра – магнитуда, время и место (положение эпицентра) землетрясения. Практика прогнозирования землетрясений на Камчатке, Сахалине и в Алтае-Саянском регионе в 2008–2018 гг. позволяет утверждать, что краткосрочный (с точностью  $\pm 1\text{--}3$  суток,  $M \pm 0.5$ ) прогноз возможен, но при этом ошибка положения эпицентра возрастает до  $\pm 300\text{--}500$  км. И наоборот, при удачном прогнозе положения эпицентра (с точностью  $\pm 50\text{--}100$  км) ошибка по времени может достигать  $\pm 10\text{--}15$  суток, а по магнитуде  $\pm 1.0\text{--}1.5$ . Для преодоления принципиальной невозможности успешного прогноза одновременно по трём параметрам (магнитуда, время, место), необходимо использовать принцип дополнительности, который разработан в квантовой механике. Применительно к практике прогнозирования, необходимо использовать комплекс различных методов. В частности, для прогноза положения эпицентра землетрясения целесообразно использовать инфракрасное, электромагнитное, инфразвуковое излучения, эмиссию газов в зонах сейсмических очагов в период подготовки землетрясений путем мониторинга упомянутых параметров с помощью спутников.

---

## **ОСОБЕННОСТИ АКТИВИЗАЦИИ ЮЖНО-АНЮЙСКОЙ СУТУРЫ (ЧУКОТКА) В НОВЕЙШИЙ ЭТАП**

*<sup>1</sup>Сим Л.А., <sup>2</sup>Брянцева Г.В., <sup>3</sup>Селиванов Д.А.*

*sim@ifz.ru*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН), Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский Государственный Университет имени М. Ломоносова (Геологический факультет), Москва, Россия

<sup>3</sup>SRK Consulting (Россия), Москва, Россия

Сложно построенная Южно-Анюйская сутура (ЮАС) разграничивает Верхояно-Колымскую и Чукотскую складчатые области. Два основных этапа геологического развития ЮАС состоят из океанического (до начала поздней юры) – времени существования обширного Прото-Арктического океана и коллизионного (поздняя юра–ранний мел). Предшественниками выделены 4 этапа деформирования, из которых нам интересен постколлизионный этап D-3,

характеризующийся правосдвиговыми субширотными разломами. «С ними со- пряжены сдвиги-сбросы ССВ простирания, к которым приурочены пояса верх- немеловых даек. Эта система на отдельных участках предопределяет положение гидросети, а к их пересечениям приурочены четвертичные депрессии ромбовидной формы» [Соколов, Тучкова и др., 2015]. По методике Н.П. Костенко [Костенко, 1999] составлена структурно-геоморфологическая схема ЮЮВ оконечности ЮАС и структур обрамления масштаба 1:1000000. В новейшей структуре ЮАС отчетливо соответствует Анюйское горное сооружение (поднятие), обрамленное новейшими разломами ЗСЗ простирания, совпадающими с долинами рек Бол. и Мал. Анюй. Субпараллельно этим разломам в пределах Анюйского поднятия выделяются еще два разлома ЗСЗ простирания, ограничивающие Анюйский хребет. На ВСВ и ЮЮЗ от Анюйского горного сооружения выделяются Илирнейское и Алучинское поднятия также ЗСЗ простирания. Все три положительные структуры разбиты серией разломов СВ простирания, которые разделяют перечисленные поднятия на серию разновысоких новейших блоков ромбовидной формы. Эти поднятия отделяются на юго-востоке района дугообразной границей ВСВ простирания предположительно разломной природы. Она отчетливо ограничивает поднятия от новейших структур ВСВ простирания: Анадырского поднятия и Чуванско-Шучинской впадины. Максимальные суммарные конэрозионные поднятия на структурах ЗСЗ простирания в отдельных блоках составляют более 1500 м, при этом по площади преобладают блоки с высотой 1000–1500 м. Узкие линейно вытянутые впадины ВСВ простирания характеризуются высотами 100–500 м. По новейшим разломам структурно-геоморфологическим методом реконструкции сдвиговых напряжений [Сим, 1991] восстановлены оси сжатия и растяжения в горизонтальной плоскости. Разломы ЗСЗ простирания, ограничивающие Анюйское новейшее поднятие и усложняющее его в центральной части, являются левыми сдвигами – противоположными направлению сдвиговых подвижек постколлизионного этапа D-3, выделенного ранее при изучении ЮАС [Соколов и др., 2015]. По всем разломам восстановлены оси сжатия в горизонтальной плоскости СВ простирания. При этом разлом, ограничивающий Анюйский хребет с ЮЮЗ, активизирован на неотектоническом этапе в разных геодинамических условиях: его ЗСЗ часть активизирована в обстановке дополнительного сжатия, а ЮЮВ часть – в обстановке дополнительного растяжения. По смещению новейших блоков в центральной части Анюйского хребта очевидно, что разлом имеет вертикальную компоненту перемещений с опущенным ЮЮЗ крылом. Предположительно он может быть крутым взбросом. Алучинское поднятие осложняет разлом СВ простирания, по которому смещение новейших блоков указывает на правосдвиговую кинематику разлома. Указанный разлом параллелен хр. Вулканый. Таким образом, новейшая тектоника унаследует крупные разломы постколлизионного этапа деформирования, выделенного предшественниками при геологическом изучении ЮАС, но при этом деформации новейшего этапа выражены преимущественно в сводово-глыбовых поднятиях с формированием новейших блоков разной высоты и правосдвиговыми смещениями по разломам ЗСЗ простирания.

## СКЕЙЛИНГ ДВУХ ХАРАКТЕРНЫХ ЧАСТОТ ОЧАГОВЫХ СПЕКТРОВ ДЛЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ВБЛИЗИ ОСТРОВА БЕРИНГ

<sup>1,2</sup>Скоркина А.А.

anna@mitp.ru

<sup>1</sup>Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

Изучение свойств очагов камчатских землетрясений до сих пор было возможно только для района Авачинского залива (вблизи г. Петропавловск-Камчатский). Активизация 2017 года ( $M_w = 7.8$ ) и его мощная афтершоковая последовательность (более 150 толчков с  $M_L > 3.5$  в первые две недели), записанные акселерометрами CMG-5TD на расстоянии от первых десятков километров (станция «Беринг», BKI) до 300 км (KBG, UK1, TUMD, SPN), позволили восстановить очаговые спектры для землетрясений этого района и определить их параметры. Так, для более 500 записей землетрясений с  $M_w = 4-7$ , удалось оценить спектры, в диапазоне 0.2–20 Гц с соотношением сигнал-шум не менее 3. Спектры были скорректированы за затухание с учетом частотно-зависимой добротности, высокочастотного параметра «каппа», а также локальных грунтовых эффектов по методике, описанной в [Скоркина, Гусев, 2017]. По уровню очагового спектра смещений для более 200 землетрясений определены сейсмический момент ( $M_0$ ), по спектрам скорости – две характерные частоты ( $f_{c1}$ ,  $f_{c2}$ ), а также рассчитан параметр [Eshelby, 1957; Brune, 1970; 1971]. Сложное строение очаговых спектров (наличие двух характерных частот) отмечено в более 70% случаев, в около 30% – значение первой и второй корнер-частот совпадают (согласие с моделью Бруна). При этом, проверено су-

ществование зависимостей типа  $f_{c_k} \sim M_0^{\beta_k}$ , где  $k = 1, 2$ , соответственно, и находили оценки показателя  $\beta_k$ . Скейлинговые свойства двух характерных частот различны:  $\beta_1$  равен 0.30,  $\beta_2 = 0.15$  (что меньше 0.23, найденного ранее для камчатских землетрясений). Предварительные оценки параметра варьируются от 0.5 до 70 МПа (медиана – 3 МПа).

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-00029.*

---

## СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ НАКЛОНА ГРАФИКА ПОВТОРЯЕМОСТИ В ТРИГГЕРНОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ КОЙНА-ВАРНА

<sup>1,2</sup>Смирнов В.Б., <sup>1,2</sup>Потанина М.Г., <sup>1</sup>Пономарев А.В., <sup>1,2</sup>Михайлов В.О.,

<sup>3</sup>Патонин А.В., <sup>4</sup>Чадда Р., <sup>1,2</sup>Бондаренко Н.Б., <sup>1,2</sup>Карцева Т.И.

e-mail: avp46@mail.ru

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

<sup>3</sup>Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта Российской академии наук, пос. Борок, Некоузский р-н, Ярославская обл., Россия

<sup>4</sup>Национальный геофизический исследовательский Институт, Хайдерабад, Индия

Годовые вариации уровня воды в водохранилищах позволяют исследовать сезонное возбуждение и релаксацию сейсмического режима. На примере классической области таких исследований Койна-Варна в Западной Индии показано, что сезонные максимумы возбужденной сейсмичности приходятся как на

интервал максимальных уровней воды в водохранилищах, так и примерно на середину интервала уменьшения глубин водохранилищ. Этот результат подтверждает известные выводы о наличии, по крайней мере, двух механизмов сезонной активизации – немедленной и задержанной. Оба они связаны с повышением порового давления, в первом случае из-за сжатия каркаса пород и, соответственно, уменьшения объема порового пространства, во втором – из-за диффузии флюида или его порового давления в глубину и в стороны от резервуара по проницаемым разломным зонам. Обнаруженное в области Койна-Варна различие локализации в пространстве областей немедленной и задержанной активизаций объясняется различием размеров и локализации областей повышенных напряжений, создаваемых весом водохранилища в первом случае и пониженной прочности, обусловленной увеличением порового давления в высокопроницаемых разломных зонах, во втором. По данным регионального каталога землетрясений в области водохранилищ Койна и Варна в Западной Индии выявлены характерные изменения параметров режима сезонной сейсмичности. На интервале активизации, как немедленной (осенней), так и задержанной (весенней) компоненты, наклон графика повторяемости уменьшается, а на интервале уменьшения активности в этих компонентах – увеличивается. В период активизации зимней (декабрь) компоненты, возникшей после затухания осенней и весенней компонент, наклон графика повторяемости увеличивается вместе с увеличением активности. Полученные результаты свидетельствуют, что сезонная активизация сейсмического режима сопровождается перераспределением процесса разрушения по его масштабам. Выявленное уменьшение наклона графика повторяемости на стадии активизации сезонной сейсмичности соответствует сценарию укрупнения сейсмических очагов, характерному для процесса слияния и роста трещин (ЛНТ), а увеличение этого параметра на спаде активности отвечает сценарию афтершоковой релаксации. Такие изменения, обнаруженные в сезонных переходных режимах и характерные для процессов подготовки и последействия тектонических землетрясений, свидетельствуют, по нашему мнению, о триггерном характере возбуждения сезонных компонент на введенной сейсмичности, динамика которых подчиняется тем же закономерностям, что и динамика тектонической сейсмичности.

---

## **ИЗВЕРЖЕНИЕ ВУЛКАНА КИЛАУЭА. СЕЙСМОГРАВИТАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ГРАВИТОМАГНИТНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ, ЗАФИКСИРОВАННЫЕ НА ЭТАПЕ АКТИВИЗАЦИИ ВУЛКАНА**

**Собисевич Л.Е.**

sobis@ifz.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

Выполнен анализ развивающегося извержения щитового вулкана Килауэа, которое существенно повлияло на природную среду архипелага Гавайи. Основное внимание сосредоточено на сейсмогравитационных процессах, обусловленных трансформацией масштабных отдельностей горной породы в структурах Гавайского пломба, сформировавшего архипелаг. Активизация сейсмогравитационных процессов в районе вулканической постройки способствовала развитию очаговых образований и, как следствие, породила возмущения в вариациях магнитного поля Земли. Сейсмогравитационный процесс и гравитомагнитные возмущения были успешно зафиксированы аппаратурными комплексами Северокавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН на этапе подготовки сильного землетрясения, очаг

которого сформировался в вулканической постройке Килауэа. Экспериментально установлено, что перед землетрясением в недрах вулканической постройки извергающегося вулкана Килауэа начали формироваться отдельные масштабные геологические структуры, ответственные за развитие сейсмогравитационных процессов и гравитомагнитных возмущений, предварявших главный удар. Зафиксированные аппаратурно прогнозистические эффекты проявились здесь за несколько часов до главного удара. Анализ экспериментальных данных, полученных аппаратурными комплексами Северокавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН и приведенного в печати представительного научного материала, отражающего геодинамические процессы в районе вулканической постройки вулкана Килауэа, позволяет сделать обоснованные выводы о том, что изучение выделенного отдельного класса сейсмогравитационных процессов сегодня становится определяющей проблемой геофизики, вулканологии и геэкологии. Наблюдаемые процессы и возмущения могут быть классифицированы как краткосрочные предвестники развивающейся экологической катастрофы в районе архипелага Гавайи.

---

## **СЕЙСМОГРАВИТАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫЕ В ПЕРИОД РАЗВИТИЯ ВЕЛИКОГО ВОСТОЧНО-ЯПОНСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ**

**Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л.**

e-mail: sobis@ifz.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

Представлены результаты обсерваторских наблюдений сейсмогравитационных процессов и гравитомагнитных возмущений, отражающих подготовку и развитие крупных землетрясений, очаговые структуры которых сформировались в зонах субдукции. Многолетние и многодисциплинарные геофизические инструментальные наблюдения на базе Северокавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН за процессами, сопровождающими развитие крупных сейсмических событий, выполнены в том числе и с помощью прецизионных кварцевых наклономеров системы Д.Г. Гриднева. Изучение большого числа полученных нами данных обсерваторских наблюдений позволяет утверждать, что тонкая структура наблюдаемых гравитомагнитных возмущений определяется в первую очередь геологическими особенностями строения среды в очаговой зоне. Данные наблюдений свидетельствуют в пользу бифокальной природы очагов сильнейших сейсмических событий. Процесс подготовки землетрясений, хотя и растянут во времени, тем не менее, является энергонасыщенным процессом. Происходят крупные реологические изменения в среде и формируются обширные зоны геофизических полей разной природы. Анализируя динамику зон дилатансии и компакции на этапе подготовки и в процессе развития крупного сейсмического события, исследователь приходит к бифокальной схеме очага землетрясения, которая структурно ассиметрична. При этом очаг тектонического события может быть представлен двойной парой сил, которые свидетельствуют о наличии в очаге излучателей квадрупольного типа. Результаты сопоставлены с оригинальными наблюдениями французских и американских ученых, которым удалось зарегистрировать упруго-гравитационный процесс в момент главного удара, определившего начало Великого восточно-японского землетрясения 2011 года [Vallée et al., 2017]. Сравнительный анализ результатов геофизических экспериментальных наблюдений открывает новые возможности для более глубокого понимания

особенностей естественных процессов в очаге на всех этапах развития катастрофического сейсмического процесса.

#### Литература

1. *Martin Vall'ee, Jean Paul Ampuero, K'evin Juhel, Pascal Bernard, Jean-Paul Montagner, Matteo Barsuglia. Observations and modeling of the elastogravity signals preceding direct seismic waves // Science. 2017. 358. 1164–1168. DOI:10.1126/science.aoa0746*

## ВОЗДЕЙСТВИЕ СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ БУРЬ НА СЕЙСМИЧЕСКИЙ ШУМ

**Соболев Г.А.**

e-mail: sobolev@ifz.ru

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

Исследовалась реакция сейсмического шума в минутном диапазоне периодов на сильные магнитные бури. Шум изучался по записям широкополосных сейсмических станций IRIS, расположенных в разных районах земного шара. Мы использовали характеристики 50 сильнейших магнитных бурь с планетарными индексами  $K_p \leq 9$ , произошедшими в интервале 1994–2017 гг. Ежеминутные вариации компонент магнитного поля X, Y, Z на разных обсерваториях получены через систему INTERMAGNET. В результате анализа сейсмического шума обнаружены сотни сейсмических импульсов, появлявшихся синхронно с быстрыми изменениями скорости компонент магнитного поля  $dX$ ,  $dY$ ,  $dZ$ . Импульсы характеризовались амплитудами в несколько мкм и продолжительностью в первые минуты. Такие импульсы выявлены на записях всех сейсмических станций, расположенных на континентах, но не обнаружены в записях идентичных станций, находящихся на вулканических островах в глубоководной части Тихого океана. Не найдено корреляции между амплитудами импульсов и величиной  $dX$ ,  $dY$ ,  $dZ$ . Амплитуды импульсов были примерно одинаковы на станциях, расположенных в сейсмически активных или пассивных регионах. Их свойства не зависят также от метеорологических условий. Гипотетически обсуждаются физические механизмы данного явления. Преобразование электромагнитной энергии магнитной бури в упругие колебания может быть связано с пьезоэлектрическим, сейсмоэлектрическим, пьезомагнитными эффектами, вызванной поляризацией и разными электрохимическими процессами в литосфере. Не исключено также влияние изменений электрических свойств в облачных слоях атмосферы Земли.

*Работа поддержанна грантом РФФИ (проект № 18–05–00026).*

## МИГРАЦИЯ В ЗАПАДНОМ НАПРАВЛЕНИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ С ПЕРИОДОМ 130 МИН, ВЫЗВАННЫХ БОЛЬШИМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ

**Соболев Г.А.**

sobolev@ifz.ru

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

Детально исследована структура пульсаций с периодом около 130 мин по записям широкополосных сейсмических станций, расположенных в разных регионах земного шара. Микросейсмические колебания в диапазоне нескольких секунд, а также полусуточные и суточные вариации земных приливов были устранены фильтрами Гаусса. Анализ записей выявил цуги колебаний с периодом  $\approx 130$  мин, вызванные землетрясениями Суматра 26.12.2004 г. с  $M = 9.1$ , в Чили 27.02.2010 г.,

$M = 8.8$  и в Японии 11.03.2011 г.,  $M = 9.0$ . Сформулируем известные в настоящее время основные свойства этих колебаний. Колебания появлялись одновременно на станциях в восточной и западной полусферах, смещенных по долготе на 180 градусов, но имели противоположную полярность фаз. Это отличает их от свободных радиальных колебаний Земли  $0S0$ . В то же время они демонстрировали временной сдвиг цугов колебаний  $2.5^\circ$  в час по мере смещения в западном направлении долготы расположения станций. В результате, когда колебания на определенной станции в определенный момент времени имели максимальную амплитуду, они отсутствовали на станции, смещенной по долготе на  $90^\circ$ , и возрастили до максимальной величины через 36 часов (1.5 суток). Цуги раньше обнаруживались на станциях, близко расположенных к эпицентру землетрясения и его антиподу. Амплитуда колебаний в цугах оценена величиной в несколько миллиметров. С увеличением расстояния от оси эпицентр – антипод эпицентра цуги выделялись хуже. Природа эффекта предположительно связана с возникновением и динамикой постсейсмических изгибных колебаний литосферы. Структура пульсаций описывается моделью затухающей синусоидальной функции. Вертикальный канал сейсмографа регистрирует нормальные к поверхности Земли колебания и в первом приближении амплитуда колебаний на станции варьирует по закону косинуса угла (по долготе) между положением станции и областью пульсации при смещении на запад. Амплитуда максимальна, когда станция находится над областью изгибных колебаний. Последняя вращается вместе с земной поверхностью, но отстает от нее на  $2.5^\circ$  в час в результате тормозящего эффекта внутреннего трения. В результате, сейсмические станции последовательно приближаются и удаляются от области изгибных колебаний, что проявляется как миграция цугов колебаний в западном направлении.

---

## ИЗМЕНЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА ПОСЛЕ БОЛЬШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

**Соболев Г.А., Закржевская Н.А.**

e-mail: sobolev@ifz.ru

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

Исследованы записи идентичных широкополосных сейсмических станций после больших землетрясений на Суматре 26 декабря 2004 г. с магнитудой  $M = 9.1$ , в Чили 27 февраля 2010 г.,  $M = 8.8$  и в Японии 11 марта 2011 г.,  $M = 9.0$ . Станции расположены в разных районах земного шара. Анализировались колебания с периодами в несколько часов. Они проявлялись как пульсации собственных радиальных колебаний Земли и продолжались более недели. При расстояниях между станциями около 3800 км записи демонстрировали противоположную полярность фаз колебаний, и при расстояниях 7600 км фазы были идентичны. Это отражалось в структуре распределения положительных и отрицательных фаз на земной поверхности. Такая структура была идентичной в одно и то же время после трех изученных землетрясений, что свидетельствует о независимости данного эффекта от свойств очагов. Пространственное положение положительных и отрицательных фаз не зависело от геологических условий вблизи станций, которые находились как в зонах субдукции, так и на платформах. Форма колебаний и распределение на поверхности Земли отличались от этих свойств земных приливов. Переходя к механизму источника, отметим следующее. Период колебаний 11 ч в несколько раз продолжительнее известного самого длинного периода сфероидальных колебаний твердой Земли  ${}_0S_2$  (53.9 мин). В связи с этим рассматриваемые колебания

могут быть вызваны процессами во внешних оболочках. Среди прочих это может быть возбуждение внутренних гравитационных волн в атмосфере. В таком случае находящаяся в поле тяжести Земли атмосфера выходит из состояния равновесия, и возникают флуктуации плотности, давления, температуры и скорости движения воздушных масс. Вертикальные перемещения масс будут регистрироваться широкополосным сейсмографом, реагирующем на изменения силы тяжести.

*Работа поддержанна грантом РФФИ (проект № 18-05-00026).*

---

## ТЕХНОГЕННЫЕ И ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В ПЛАТФОРМЕННЫХ РАЙОНАХ КАЗАХСТАНА

*Соколова И.Н., Михайлова Н.Н., Полешко Н.Н., Великанов А.Е.*

e-mail: sokolova@knndc.kz

Институт геофизических исследований Министерства энергетики Республики Казахстан, Алматы, Казахстан

Начиная с 1994 года, на территории Казахстана функционирует сеть мониторинга Института геофизических исследований (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 основном на территории и вблизи карьеров, где регулярно производятся мощные взрывы, а также на нефтегазовых месторождениях. В докладе приводится информация о событиях техногенной и индуцированной природы на территории Казахстана. Исследованы техногенные землетрясения на месторождениях твердых полезных ископаемых (Жезказганское месторождение и карьер Жомарт 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). Природа возникновения таких землетрясений может быть разной: на месторождениях твердых полезных ископаемых это динамические проявления горного давления, вследствие которого происходят обрушения породы, горные удары. В нефтегазоносных провинциях техногенные землетрясения связаны, как правило, со снижением пластового давления в нефтяной толще, а в районах проведения подземных ядерных взрывов (ПЯВ) – с обрушением полостей, образовавшихся после взрывов. Также вблизи крупных активных карьеров могут возникать природно-техногенные землетрясения с очагами, приуроченными к активным разломам (район добычи железных руд, г. Рудный, район угольных карьеров, г. Караганда, оз. Шалкар и др.). Некоторые землетрясения имели магнитуду больше 5, и интенсивность 6 и выше. Анализ исторической сейсмичности показал, что такие землетрясения стали происходить сравнительно недавно. Несмотря на большое количество техногенных событий, зарегистрированных сетью ИГИ, они не отражают общей картины геодинамической активности в районах интенсивного техногенного воздействия, так как в целом представительная магнитуда трява для всей территории Казахстана по стационарной сети сейсмических наблюдений составляет 3.0–3.5. Необходимо проводить постоянный мониторинг специальными сетями сейсмических наблюдений в районах крупных месторождений твердых полезных ископаемых, нефтегазовых месторождений, а также СИП, так как сильные землетрясения в таких районах опасны не только большим количеством жертв, разрушений и экономических потерь, но и возможными серьезными экологическими последствиями.

## **ВАРИАЦИИ АКУСТИЧЕСКОГО И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЕЙ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ В ГФО «МИХНЕВО» И ЦГМ ИДГ РАН**

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

e-mail: soloviev@idg.chph.ras.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

Синхронные вариации атмосферного давления и напряженности электрического поля могут наблюдаться в целом ряде случаев, когда источниками этих вариаций являются природные и техногенные процессы. При этом синхронные возмущения поля давления и электрического поля наблюдаются в приземном слое атмосферы для довольно широкого диапазона периодов колебаний: от колебаний на частоте Брента-Вайсяля и ниже и до колебаний в акустической (инфразвуковой) области. Известно, что при прохождении атмосферных фронтов изменение таких параметров, как давление, температура и напряженность атмосферного электрического поля тесно связаны между собой. Совместная обработка записей давления и электрического поля показала, что развитая конвекция в атмосфере и связанная с ней грозовая активность сопровождаются генерацией акусто-гравитационных волн и сопутствующими им возмущениями атмосферного электрического поля, причем наблюдается приблизительная пропорциональность амплитуды возмущений электрического поля и амплитуды изменения давления. В настоящей работе на основе наблюдений в Геофизической обсерватории (ГФО) «Михнево» и Центра геофизического мониторинга (ЦГМ) ИДГ РАН помимо вариаций атмосферного давления и напряженности электрического поля, связанных с прохождением атмосферных фронтов, рассмотрены возмущения, обусловленные прохождением солнечного терминатора. Обработка полученных материалов натурных наблюдений проводилась с использованием взаимного корреляционного анализа волновых форм вариаций давления и напряженности электрического поля. Было установлено, что во время прохождения утреннего терминатора регистрируются синхронные низкочастотные колебания атмосферного давления и напряженности электрического поля с периодами близкими к частоте Брента-Вайсяля. Основной максимум в спектрах мощности, как для вариаций давления, так и для напряженности электрического поля приходится на одну и ту же частоту. Синхронные вариации давления и напряженности электрического поля удается выделить в условиях близких к «хорошей погоде», когда влияние неблагоприятных метеорологических явлений сводится к минимуму.

---

## **К ПРОБЛЕМЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ ВОЗМУЩЕНИЙ ИОНОСФЕРЫ ОТ РЕГУЛЯРНЫХ И НЕРЕГУЛЯРНЫХ ГЕО-ГЕЛИОФИЗИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ**

**Сомсиков В.М., Андреев А.Б., Капыгин В.И.**

vmsoms@rambler.ru

Институт ионосферы, Алматы, Казахстан

Идентификация возмущений ионосферы от регулярных и нерегулярных гео-геофизических источников является одной из ключевых проблем геофизики. Ее актуальность обусловлена необходимостью прогноза катастрофических геофизических явлений, связанных, например, с землетрясениями, торнадо и др. Для ее решения необходимо как развитие теорий возмущений параметров атмосферы, включая ионосферу, для различных источников возмущений, так и развитие методов статистической обработки экспериментальных данных, полученных

радиофизическими методами. Нами также предлагается развитие математического аппарата описания возмущений атмосферы от гео-гелиофизических источников на основе уравнений неравновесной термодинамики. Показывается, что для учета эволюционных процессов, атмосферу необходимо считать открытой неравновесной динамической системой. Обсуждаются трудности, которые возникают при построении математических моделей эволюционной атмосферы. В частности, трудности, связанные с информационным обеспечением модели необходимым рядом данных, с нелинейностью воздействия на атмосферу внешних факторов, таких, как потоки поступающей в атмосферу и уходящей солнечной энергии, зависимостью процессов эволюции от естественных и антропогенных факторов. Рассматриваются пути развития математического аппарата для описания открытых неравновесных динамических систем, какой, в частности, является атмосфера. Предлагаются модифицированные уравнения для описания открытой атмосферы. Рассматриваются некоторые фундаментальные проблемы физики, решение которых необходимо для построения эволюционной модели атмосферы. Обсуждаются возможности выявления характерных особенностей возмущений атмосферы, включая ионосферу с помощью предложенного математического аппарата, а также выполняется со-поставление теоретических выводов с данными экспериментальных наблюдений возмущений атмосферы для регулярных и нерегулярных источников, в частности, для солнечного терминатора, мощного торнадо, солнечных вспышек.

---

## МОДЕЛЬ ГЕНЕРАЦИИ ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ ВОЛНОЙ ЦУНАМИ

*Сорокин В.М., Ященко А.К.*

*sova@izmiran.ru*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкина (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия

В работе рассмотрен механизм генерации возмущения геомагнитного поля, сопровождающего распространением волны цунами. Источником возмущения являются электрические токи в морской среде и в ионосфере. Ток в морской среде возникает в результате ее движения в волне цунами в геомагнитном поле, а ток в ионосфере возникает в результате падения на нее акусто-гравитационной волны (АГВ), распространяющейся из атмосферы. Её источником является вертикальное смещение поверхности морской среды во время распространения в ней волны цунами. Несмотря на то, что проводимость ионосферы значительно меньше проводимости морской среды, величина тока в ней может превышать величину тока в морской среде в результате экспоненциального роста амплитуды акусто-гравитационной волны в процессе ее распространения вверх. Получено пространственное распределение геомагнитных возмущений, генерируемых электрическими токами, протекающими в морской среде и в ионосфере, с учетом их взаимной индукции. Наличие электрического тока в ионосфере значительно меняет характеристики возмущения геомагнитного поля, генерируемого волной цунами. С ростом горизонтального масштаба волны цунами и глубины морской среды ток в ионосфере, генерируемый АГВ, может увеличить амплитуду наблюдаемого на земле возмущения в несколько раз. Оценки показывают, что для параметров дневной ионосферы амплитуда геомагнитных возмущений, связанных с волной цунами, может достигать значений (1–10) нТл. В ночных условиях интегральная проводимость ионосферной плазмы уменьшается на порядок, что приводит к

существенному уменьшению влияния ионосферных токов. В модели электрический ток в ионосфере, генерируемый АГВ, замыкается на сопряженную ионосферу с помощью продольных токов, что приводит к возбуждению поперечных компонентов магнитного и электрического полей на высотах верхней ионосферы и магнитосферы. Амплитуда магнитного и электрического полей, а также продольного тока в ионосфере могут достигать значений порядка 10 нТл, 10 мВ/м, и  $10^8$  А/м<sup>2</sup>, соответственно. Это позволяет сделать вывод о возможности мониторинга волн цунами космическими методами.

---

## О ВОЗМОЖНОСТИ СТИМУЛИАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ИОНИЗИРУЮЩИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

<sup>1</sup>*Сорокин В.М.*, <sup>1</sup>*Ященко А.К.*, <sup>2</sup>*Новиков В.А.*

e-mail: alex@izmiran.ru

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Москва, Россия

Рассмотрен возможный механизм инициирования землетрясений ионизирующим излучением солнечных вспышек. Представлены теоретическая модель и результаты расчетов возмущений электрического поля, электрического тока и тепловыделения в литосфере, связанных с поглощением ионизирующего излучения солнечных вспышек. В результате крупномасштабного в горизонтальном направлении возмущении проводимости нижней области ионосферы в присутствии внешнего электрического поля возможна генерация возмущений геомагнитного поля в диапазоне периодов единицы-десятки секунд. Амплитудно-временные характеристики сигнала определяются возмущением интегральных проводимостей ионосферы. В зависимости от соотношения между интегральными проводимостями Холла и Педерсена возмущенной ионосферы может наблюдаться осциллирующий и апериодический режимы магнитных возмущений. Для сильных возмущений проводимости ионосферы амплитуда пульсаций может достигать  $\sim 10^2$  нТл. При этом, амплитуда горизонтальной компоненты электрического поля на поверхности Земли достигает 0.01 мВ/м, плотности электрического тока в литосфере  $10^{-6}$  А/м<sup>2</sup>, а плотность мощности выделения тепла этим током достигает  $10^{-7}$  Вт/м<sup>3</sup>. В работе показано, что поглощение ионизирующего излучения солнечных вспышек может вызвать вариации плотности теллурических токов в сейсмогенных разломах, сопоставимые с плотностями тока, генерируемыми в земной коре искусственными импульсными источниками (геофизический МГД-генератор «Памир-2» и электроимпульсная установка «ЭРГУ-600»), которые вызывают инициирование региональных землетрясений и пространственно-временное изменение сейсмической активности. Следовательно, инициирование сейсмических событий возможно не только искусственными источниками электрического тока, но и солнечными вспышками. Результаты работы могут служить физической основой для использования нового подхода к решению проблемы краткосрочного прогноза землетрясений, основанного на электромагнитных триггерных эффектах.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-00255.*

## **ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ ОПАСНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЯХ**

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

e-mail: spivak@idg.chph.ras.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

Разработка прогностических признаков возможного прихода урагана или сильной грозы является важной задачей с точки зрения предупреждения нежелательных последствий сильных и, как правило, опасных для здоровья человека, его производственной деятельности и инфраструктуры атмосферных явлений. Представляется, что одним из возможных подходов к решению задачи является изучение особенностей вариаций физических полей в периоды времени, предшествующие указанным выше атмосферным явлениям. В настоящей работе с привлечением данных, полученных в результате комплексных инструментальных наблюдений, выполненных в Геофизической обсерватории «Михнево» ИДГ РАН, показано, что ураганы, шквалы и сильные грозы сопровождаются не только увеличением скорости ветра, но также увеличением амплитуды микробарических вариаций, вариаций микросейсмического фона и напряженности электрического поля. Также установлено, что рассматриваемые сильные возмущения атмосферы за несколько часов до основного события предваряются повышенными амплитудами микробарических вариаций в диапазоне частот акусто-гравитационных волн, а также низкочастотными вариациями электрического поля и вариациями микросейсмического фона в диапазоне частот 0,008–20 Гц. При этом в этот период наблюдаются изменения в спектрах микробарических вариаций и вариаций электрического поля. В совокупности с метеорологическими параметрами атмосферы указанные эффекты можно рассматривать в качестве комплексного прогностического признака приближающегося урагана или шквала. Полученные данные служат основой для проведения целенаправленных исследований, связанных с формулировкой критериев, которые можно использовать для прогноза опасных атмосферных явлений на основе анализа физических полей.

---

## **ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ, ВЫЗВАННЫЕ ПАДЕНИЕМ ЧЕЛЯБИНСКОГО БОЛИДА**

*Спивак А.А., Рыбнов Ю.С., Соловьев С.П., Крашенников А.В.,  
Рябова С.А., Харламов В.А.*

spivak@idg.chph.ras.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

Падение космических тел на Землю вызывает сильные атмосферные явления, проявляющиеся в нагреве и свечении воздушных масс, образовании ударной, а затем и акустической волн и т.д., которые сопровождаются возмущением геофизических полей. Инструментальные наблюдения за вызванными вариациями геофизических полей позволяют получить важную информацию о характере воздействия космических тел на атмосферу Земли, а также сформировать количественную основу для верификации теоретических и численных моделей, разрабатываемых для описания реакции внешних геосфер на сильные локальные возмущения и установления и обоснования механизмов взаимодействия и преобразования полей Земли. В настоящей работе на основе результатов комплексных натурных наблюдений, выполненных в Геофизической обсерватории «Михнево» ИДГ РАН, установлены

синхронные вариации электрического и магнитного полей на земной поверхности при падении Челябинского болида (15.02.2013 г.). При этом впервые отмечены вариации указанных полей не только во время пролета космического тела в атмосфере Земли (первичный эффект), но и в период прихода, вызванного болидом низкочастотного акустического сигнала в точку наблюдений (вторичный эффект), что произошло через некоторое время после основного события (время распространения акустического сигнала от источника до места регистрации). Полученные данные, касающиеся характера и амплитудных характеристик акустического сигнала и вызванных вариаций электрического и магнитного полей, расширяют сложившиеся к настоящему времени представления о геофизических последствиях падения космических тел на Землю. Одновременно с этим предоставляются новые возможности для оценки энергии акустического источника и разработки перспективных подходов к установлению источников и механизмов возмущений электрического и магнитного полей в атмосфере Земли на основе сопоставительного анализа их вариаций и возмущений поля акустических колебаний при падении метеоритов.

---

## УЧЕТ ЗАДАННОГО РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ И СФЕРИЧНОСТИ ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМАЦИИ В ЗЕМНОЙ КОРДЕ

<sup>1,2</sup>*Степанов Ю.П.,<sup>1,2</sup>Бакеев Р.А.,<sup>1</sup>Суворов В.Д.,<sup>1</sup>Мельник Е.А.*

e-mail: yu\_st@mail.ru

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН), Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН), Томск, Россия

В основе численного расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) в геологических средах лежат методы, разработанные в механике сплошной среды. Однако при решении задач геомеханики возникает ряд специфических проблем, связанных с большими размерами исследуемых областей, недостатком сведений о свойствах среды и условиях деформирования. Также остается открытым вопрос о влиянии и необходимости учета сферичности при рассмотрении процессов деформации для областей разной протяженности и глубины. Первая проблема связана со значительным вкладом в напряженное состояние гравитационных сил. Это приводит к тому, что при рассмотрении процессов начальным является напряженное состояние, вызванное действием силы тяжести, расчет которого является первым этапом решения задачи. Результатом такого расчета в рамках обычных алгоритмов мы получим распределения напряжений в деформированной среде с искаженным рельефом, не соответствующим первоначально заданному. Легко оценить, что при толщине модели в десятки километров даже при упругом состоянии искажения геометрии будут значительны. При пластической деформации искажения могут быть значительно больше. Таким образом, возникает серьезная задача расчета напряженного состояния соответствующего заданному рельефу, например, горной системы. В представленной работе предложен алгоритм расчета напряженного состояния области земной коры в условиях гравитации с сохранением заданного рельефа и геометрии неоднородностей. Разработанный алгоритм апробирован для упругого и упругопластического поведения среды. В качестве

примера рассмотрено НДС трёхслойной блочной модели земной коры и верхов мантии, вдоль профиля Тарим–Алтай протяженностью 2500 км и глубиной 90 км. Результаты расчетов показали, что применение разработанного алгоритма обеспечило сохранение рельефа после расчета начального напряженного состояния, обусловленного действием силы тяжести. На втором этапе расчета рассмотрено влияние тектонического сжатия на изменение НДС, рост горных систем и формы границы Мохо. Проведено сравнение решений, полученных с учетом сферичности и для прямоугольной области. Показано заметное влияние учета сферичности на НДС. Моделирование процессов деформации выполнено для условий плоской деформации. Решалась система уравнений динамики упругопластической среды. Описание деформации за пределом упругости осуществлялось в рамках модифицированной модели Друккера–Прагера–Николаевского.

*Работа выполнена в рамках проекта IX.128.1.1. Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук.*

---

## **ВЛИЯНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА ГИДРОСФЕРУ ГОРНОПРОМЫШЛЕННОГО РЕГИОНА**

**Степаненко М.С.**

*maria-stefunko@yandex.ru*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия

При разработке колчеданных месторождений на всех этапах технологического процесса образуются сточные воды различные по своему химическому составу и концентрации загрязняющих веществ. Совокупность природных и техногенных процессов, протекающих при освоении месторождений, обеспечивает перераспределение вещества. Процессы взаимодействия проходят через фазы превращений на физическом (перемешивание, осаждение), химическом, биологическом (бактериологическом) уровнях. Образующиеся воды при инфильтрации атмосферных осадков через тело отвалов с высоким содержанием тяжелых металлов представляют наибольшую экологическую опасность. Под воздействием температуры, влажности воздуха и кислорода интенсивно протекают процессы выветривания и выщелачивания, накапливаются токсичные элементы в высоких концентрациях. Наряду с климатическими факторами активно протекают биохимические процессы. Важнейшую роль в переносе металлов из техногенно метаморфизованных руд, находящихся в прибрежных зонах карьера, шахтных целиках, минерализованных отвалах, концентрировании в техногенных водах и отложении в почве играют гидротермальные процессы. В основе переноса лежит растворимость рудных фаз металлов, первичных – сульфидов и окисленных форм. Несовместимость и ограниченность экологической информации не позволяет составить полную картину экологической ситуации, что мешает выработать единые принципы снижения техногенной нагрузки горно-перерабатывающих предприятий на экосистему. В связи с этим возникает необходимость применения комплексного подхода, учитывающего уникальность и специфику разработки каждого месторождения полезных ископаемых и технологическое оснащение горного производства, а также обеспечивающего эколого-экономический баланс. Основные принципы разработки инструментария для эффективного формирования модели комплекса мероприятий, снижающих техногенную нагрузку на экосистемы, должны включать в себя: системность, согласованность,

стандартизированность, сбалансированность, сходимость, синхронизированность, специфицированность.

---

## **УВЕЛИЧЕНИЕ ВЫХОДА РАДОНА КАК РЕАКЦИЯ СРЕДЫ НА ВИБРОВОЗДЕЙСТВИЕ: ВОЗМОЖНЫЕ МЕХАНИЗМЫ И ПОДХОДЫ**

**Сухоруков М.В.**

m-vsru@yandex.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

Существует довольно много исследований, изучающих выход подземного газа радона на земную поверхность и из лабораторных образцов. Среди них очень мало встречается таких, учитывающих колебательный характер твердой среды, от которой отделяется газ радон  $^{222}\text{Rn}$ . Чаще изучается связь между изменением амплитуды концентрации радона и характеристиками высокозэнергетического сейсмического события. Низкоамплитудные события, как правило, не рассматриваются, хотя именно при их участии происходит жизнь людей и окружающего животного и растительного мира. Довольно весомым представляется аргумент, что радон переносится газами, встречающимися в земной коре. Так, концентрация радона даже в подпочвенной атмосфере незначительна: на 18 порядков ниже концентрации азота. Поэтому совместное изучение колебаний среды и пропускной способности каналов миграции газообразного радона, а, следовательно, и несущего его газообразного флюида, представляется важной задачей. Для изучения возможного механизма воздействия виброколебаний на количество выходящего радиоактивного газа, а тем более для управления этим механизмом важно выделить ключевые характеристики изучаемых объектов. Так, колебания пород характеризуются амплитудой, скоростью, ускорением частиц среды, а также частотой. Если обобщенно, то суммарной энергией колебаний. В большинстве опубликованных статей на рассматриваемую тему принимается положение, что чем больше энергия подается в среду, тем больше будет выход радона. Между тем эксперимент может давать и другие результаты. Для среды, когда речь идет о переносе через неё флюида, принято учитывать тип пород, слагающих рассматриваемый участок, наличие или отсутствие источников флюида(радона) на данном участке, определять уровень и направление движения подземных вод, а главное находить пористость и проницаемость. Среда принимается по умолчанию сплошной, что бывает оправданным для простоты описания. Однако изучение геосред показывает не только наличие всевозможных неоднородностей, разломов, трещин и прочее, но слагающих сплошных элементов: блоков, зерен, отдельных включений. Всё это многообразие среды переноса флюида(радона) находит разный отклик на частоту вибровоздействия. К примеру, в ИДГ РАН экспериментально получен результат максимального выхода радона из гранитовых образцов при частоте около 16 Гц. На близкой частоте 16, 6 Гц по полевым данным района Нелидово–Рязанской тектонической структуры отмечается тесная связь между амплитудой эманации радона и относительной амплитудой микросейсмических колебаний. Оба этих результата показывают избирательность среды на частоту воздействия.

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГЕОСРЕДЕ БИШКЕКСКОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА (БГП)

<sup>1</sup>*Сычев В.Н.,<sup>2</sup>Богомолов Л.М.,<sup>1</sup>Сычева Н.А.*

koitash@mail.ru

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научная станция Российской академии наук в г. Бишкеке, Бишкек, Киргизия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

На прошлых конференциях «Триггерные эффекты в геосистемах» обсуждалось, что результатом ЭМ воздействий для Бишкекского полигона РАН явилось кратко-временное повышение слабой сейсмичности (в диапазоне классов 7–10) через 5–10 суток после воздействия, с последующим сокращением числа событий классов 10–12 на 12–24 сутки после даты ЭМ воздействия [Сычев и др., 2010]. Эффект прироста активности на 5–7 сутки в некоторые периоды эксперимента превышал уровень 2 СКО, а для откликов с меньшими задержками эффект оценен на уровне значимости 1 СКО. Вместе с тем, известны работы, где отмечено, что активизация происходит в более короткий период – 35 часов [Смирнов, Завьялов, 2012] Ранее при обработке данных рассматривался сравнительно короткий интервал времени: либо пуски МГД-генератора (1983–1989 гг.), либо дополнительные зондирования однополярными импульсами (2000–2005 гг.). В настоящем докладе анализируется сейсмический режим в течение всего периода времени с 1983 по 2018 гг., когда на Бишкекском геодинамическом полигоне на один и тот же диполь подавались импульсы тока, генерируемые различными источниками и в различных режимах. Актуальность нового обращения к материалам об ЭМ воздействиях на геосреду определяется следующим. В период 1983–1989 гг. кроме пусков МГД генераторов проводились разряды конденсаторной батареи, так называемые холодные пуски. Интерпретация с учетом вклада энергии этих пусков описана только в труднодоступных источниках [Сычев и др., 2010; Богомолов и др., 2011]. В течение 90-х годов проводились зондирования земной коры знакопеременными (двуполярными) импульсами тока с помощью установки ЭРГУ-600-2. Но проверке априорного предположения об отсутствии влияния переменного тока не уделено достаточного внимания. В докладе представляется сравнение сейсмического режима на Бишкекском геодинамическом полигоне с другими сейсмоактивными районами, приводятся данные анализа сейсмической активности во времени, энергетических характеристик, сейсмотектонических деформаций и динамических параметров.

---

## ИЗМЕРЕНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЯ РАЗОГРЕТОГО ГАЗА В ЩЕЛИ ПРИМЕНЕНИЕЛЬНО К БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЕ

<sup>1,2</sup>*Таирова А.А.,<sup>1</sup>Беляков Г.В.*

moscouposte@gmail.com

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт динамики геосфер, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

Одной из наиболее перспективных технологий разработки пород Баженовской свиты является термогазовый метод воздействия на пласт. Предполагается, что в процессе теплового воздействия может формироваться область пиролиза керогена

(нерасторимое воскообразное органическое вещество, входящее в состав сланцев), продвигающаяся в направлении фильтрационного потока. При пиролизе будет происходить увеличение пористости. С точки зрения гидродинамики, моделью подобного процесса может рассматриваться плавление и испарение части вещества, формирующего скелет проницаемых пород, при разогреве фильтрационным потоком, имеющим высокую температуру. Исследование процессов горения и фильтрации состоит из решения задач: (1) это определение условий распространения волн экзотермической реакции в спутном фильтрационном газовом потоке, в котором продукты реакции представлены разными фазами – жидкой и газообразной, (2) определение скорости и количества уносимой массы материала стенок щели горячими продуктами горения совместно с газовым потоком. При решении обеих задач необходимо найти связь между потоком тепла, выделяемым при горении, и интегральной скоростью уноса массы с поверхности щели. Для этого была создана оригинальная экспериментальная установка и отработана методика по изучению фильтрации разогретых воздушных потоков через щель с постоянным вдоль длины поперечным сечением. Экспериментальным путем была определена температура испаряющейся поверхности. Были измерены скорости потока, а также уноса массы с поверхности щели нагретыми спутными потоками воздуха и продуктов горения. В ходе проведения опытов так же были измерены газодинамические параметры воздушных потоков в пористой среде, заполняющей щель.

*Работа выполнена в рамках гос. задания по теме № 0146-2019-0007.*

---

## **СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ И ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В СЕЙСМОАКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ ЗЕМЛИ**

**Тарасов Н.Т.**

e-mail: tarasov@ifz.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

Изучено влияние магнитных бурь с внезапным началом (SSC) на глобальную сейсмичность Земли. Для выделения вызванных изменений сейсмичности на фоне ее естественных вариаций использовалась методика наложения эпох. Получена осредненная (за период 1973–1981 гг.) зависимость ежесуточного количества землетрясений с  $M_s > 4.4$  от времени в пределах временных окон  $\pm 30$  сут от SSC. Показано, что после SSC происходит статистически значимое уменьшение количества землетрясений на 2%, а через 5–6 сут их число начинает вновь возрастать. Интересно, что отмеченное затухание сейсмичности началось, как минимум, за 2–3 сут до SSC. Следовательно, бури не могли быть его причиной. Можно предположить, что изменение сейсмичности вызывает ионизирующее электромагнитное излучение (ЭИС) солнечных вспышек (СВ), которое достигает Земли всего за 8.2 мин. Чтобы проверить это, по той же самой методике было изучено изменение интенсивности ЭИС в радиочастотном диапазоне, которое часто используется как мера его ионизирующего излучения. Оказалось, что во временном окне  $\pm 30$  сут от начала бурь мощность ЭИС имеет единственный максимум, который опережает SSC на трое суток, что совпадает по времени с началом снижения сейсмической активности. Тогда по той же методике было изучено изменение сейсмичности до и после резких всплесков мощности ЭИС. Оказалось, что после них на Земле происходит резкое статистически значимое уменьшение количества землетрясений, которое точно совпадает с ними по времени. Сразу же после всплесков число землетрясений падает на 5%, а затем начинает плавно возрастать. Объяснить это

можно тем, что Земная кора постоянно облучается электромагнитными волнами, порождаемыми приэкваториальной грозовой активностью. Такое облучение стимулирует магнитопластичность слагающих ее горных пород, ускоряет релаксацию упругих напряжений и вызывает их перераспределение. Это, в свою очередь, оказывает триггерное воздействие на слабую и умеренную сейсмичность. Ухудшение условий распространения электромагнитных волн, вызываемое сначала ионизирующим излучением СВ, а затем магнитными бурями, снижает интенсивность электромагнитных полей, порождаемых грозовой активностью, и замедляет этот процесс, что в конечном итоге снижает сейсмическую активность. Это хорошо согласуется с результатами работ автора, в которых было обнаружено, что искусственное облучение земной коры Гармского района Таджикистана мощными электромагнитными импульсами (ЭИ) вызывало в нем заметную активизацию слабых и умеренных землетрясений ( $c\text{ mb} = 2.2\text{--}5.6$ ). Помимо ЭИ, триггерное воздействие на сейсмичность этой области оказывали и семипалатинские ядерные взрывы (ЯВ). Было обнаружено, что облучение коры ЭИ перед ЯВ повышает их триггерное воздействие, т.е. электромагнитное поле повышает их эффективность. В связи с этим, по той же методике, что и раньше, воздействие ЯВ на сейсмичность этой области было изучено по двум выборкам. В одну из них были включены только те взрывы, в течение  $\pm 30$  сут до и после которых наблюдались резкие повышения интенсивности ЭИС, а в другую вошли ЯВ до и после которых таких событий не фиксировалось. Оказалось, что в первом случае (при низкой интенсивности электромагнитных полей, порождаемых грозовой активностью) количество землетрясений возрастает в 2 раза. Причем, это изменение статистически не значимо. А во втором (при ее высокой интенсивности), наблюдалось статистически высоко значимое 1 приращение числа землетрясений на 10%. Это подтверждает предположение о том, что к снижению сейсмической активности после СВ приводит уменьшение интенсивности электромагнитных полей, порождаемых грозовой активностью.

---

## **ВЛИЯНИЕ НА СЕЙСМИЧНОСТЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ВЗРЫВОВ. ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ**

*Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В.*

*tarasov@ifz.ru*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

Ранее авторами было показано, что облучение коры одной из наиболее сейсмоактивных областей Средней Азии – Гармского района Таджикистана мощными электромагнитными импульсами (ЭИ) вызвало заметную активизацию его сейсмичности. Повышение суммарной сейсмической энергии (ССЭ) оказалось при этом на 5 порядков больше энергии ЭИ. Из этого следует, что облучение оказывает триггерное воздействие на области подготовки землетрясений. Помимо ЭИ, триггерное воздействие на сейсмичность этой области оказывали и семипалатинские подземные ядерные взрывы (ЯВ). Поскольку неясно, как характер сейсмического отклика на эти факторы может зависеть от их сочетания, рассмотрены особенности их комбинированного воздействия. Сначала изменение сейсмичности этой области после ЯВ было изучено только в период проведения экспериментов по облучению коры. Показано, что воздействие ЯВ, также как и ЭИ, вызывает статистически значимую активизацию сейсмичности и приводит к значительному росту ССЭ. Однако облучение коры вызывает более сильную активизацию

сейсмичности, чем ЯВ. Обнаружено, что облучение коры перед ЯВ повышает эффективность их триггерного воздействия, тогда как взрывы, произведенные перед облучением, снижают эффективность воздействия ЭИ. В пространстве выявлены две области аномального повышения ССЭ после облучения и взрывов. Одна из них приурочена к активному Дарваз-Каракульскому разлому, разделяющему Таджикскую депрессию и Дарвазский хребет, а другая – к второстепенному разлому в северной части депрессии. Обе они имеют сложную конфигурацию в виде двух «лепестков», расположенных на разных крыльях этих разломов. В обоих случаях один из «лепестков» проявляется после ЭИ, а второй – после ЯВ. «Лепестки» не пересекались и по глубине. После ЭИ сильный рост ССЭ возникал в приповерхностном (0–5 км) слое, а после ЯВ на глубинах более 5 км, т.е. ЭИ и ЯВ вызывают активизацию разных геологических структур. По-видимому, каждая из этих «бабочек» представляет собой единую аномальную область, различные части которой активизируются воздействием определенной физической природы, что может быть обусловлено особенностями физико-механических характеристик массивов горных пород. Ранее было показано, что наиболее заметная активизация сейсмичности после облучения коры наблюдается в областях повышенных тектонических напряжений. Следовательно, наиболее сильная активизация сейсмичности после ЯВ также возникает в областях повышенных напряжений. Этот вывод подтверждается и тем, что в периоды подготовки наиболее сильных землетрясений Гармского района эффективность триггерного воздействия ЯВ была существенно выше, чем в другие периоды времени. Поскольку осталось неясным, что в большей мере определяет возникновение таких областей – геологическое строение или локальные изменения напряжений, триггерное воздействие ЯВ было изучено не только в период облучения, но и в такие же интервалы до начала и после завершения этих экспериментов. Оказалось, что до и после них таких аномальных областей не наблюдалось. Следовательно, их появление в большей мере связано с концентрацией напряжений, возможно, с подготовкой сильных землетрясений. Однако сильных событий в этих областях так и не произошло, что может быть связано с релаксацией упругих напряжений, вызванных облучением коры. Интересно, что после завершения этих экспериментов в радиусе ~ 60 км от источника облучения вообще не наблюдалось областей повышенных напряжений. Следовательно, облучение коры привело к их релаксации на обширной территории площадью ~ 3500 км<sup>2</sup>, но судя по значительной активизации сейсмичности, вызванной ЯВ, на юго-западной и восточной юго-восточной окраинах, это привело к росту напряжений на периферии облучаемой области.

---

## ВЛИЯНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ И РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СРЕДЫ НА СТРОЕНИЕ НАДВИГОВЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СТРУКТУР

*Татяурова А.А., Стефанов Ю.П.*

e-mail: yu\_st@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН), Новосибирск, Россия

Складчато-надвиговые пояса формируются в результате коллизионных процессов на периферии горных систем. Для них характерно формирование надвиговых и покровных структур большой протяженности. Не смотря на многочисленные экспериментальные и теоретические исследования, в настоящий момент отсутствует четкое представление о связи реологических свойств среды и условий скольжения

по фундаменту с видом деформационных структур и строением разломных зон. В связи с этим в работе численно исследовано влияние прочностных и реологических параметров, а также трения между деформируемым слоем и основанием на формирование разломов и общее строение надвиговых деформационных структур. Рассмотрена задача о деформировании слоя геосреды клиновидной формы, лежащего на жестком основании. Предполагалось, что слой находится под действием гравитации, его верхняя граница горизонтальна и свободна от напряжений. Нижняя граница наклонена под углом порядка  $1.5^\circ$ . Между деформируемым слоем и жестким основанием действует трение. Деформирование слоя осуществляется смещением боковой границы. Такие условия соответствуют модели тектонического клина, мощность которого увеличивается по направлению к горной системе, а деформация происходит за счет давления со стороны гор. Численное моделирование осуществлялось путем решения системы уравнений динамики в рамках модели упруго-вязкопластической среды для условий плоской деформации. Поведение среды за пределом упругости описывалось моделью Друккера-Прагера-Николаевского с неассоциированным законом течения. Результаты расчетов показали, что область зарождения разломных структур определяется прочностными параметрами среды, в первую очередь внутренним трением. Зарождение и развитие зон локализации на подошве осадочной толщи наблюдалось лишь при низких значениях внутреннего трения, тогда как, при высоких значениях, характерных для сухих горных пород, развитие полос локализации деформации происходит с дневной поверхности. На основе выполненных расчетов получены оценки влияния прочностных и реологических свойств, а также трения в основании и его изменений в ходе деформации на общее строение надвиговой зоны, включая рост горных структур и рельеф поверхности.

*Работа выполнена в рамках проекта IX.128.1.1. Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук и частичной поддержке РФФИ (грант № 19-05-00378).*

---

## **ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОДЫ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА**

**Тримонова М.А., Турунтаев С.Б., Зенченко Е.В., Фасхеев И.О.**

*fiomsu@mail.ru*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

Теория распространения трещин в грунтах имеет большое практическое значение при моделировании процессов, происходящих в породах под воздействием различных систем нагрузок. Одной из задач подобного рода является задача об инициации и распространении трещин при гидроразрыве пласта. Данная задача имеет важное значение для нефтегазовой промышленности, а развитие компьютерной техники позволяет создавать все более совершенные симуляторы гидроразрыва на основе уравнений механики сплошных сред. Большое количество современных работ показывает, что для точного моделирования распространения трещин в породе недостаточно уравнений, полученных исключительно в рамках упругого режима деформирования, и очень важно рассматривать влияние пластичности на процессы деформирования среды. Применительно к гидроразрыву пластичность, возникающая вблизи кончика трещины, обеспечивает существенное изменения предела прочности. Одним из первых предложенных условий прочности материалов является условие Кулона-Мора. Главным достоинством данного

критерия является сравнительная простота. Следующим важным обобщением данной прочностной модели стала модель Друккера-Прагера, сформулированная в рамках ассоциированного закона течения. Позднее В.Н. Николаевским была предложена модель с использованием неассоциированного закона течения. В данной работе рассматривается влияние упругопластических свойств геологического материала на развитие трещины гидроразрыва пласта. Результаты данного исследования апробируются на данных, полученных из лабораторных экспериментов по развитию трещин ГРП. В качестве геологического материала берется материал образцов, для которого ранее измерялись все упругопластические свойства. Знание всех свойств материала и условий постановки экспериментов дает возможность почти полного численного моделирования этих экспериментов. Основным результатом работы является определение влияния упругопластических свойств на инициацию трещины гидроразрыва и сравнение теоретических ожиданий с реальными данными.

---

## ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

*Трофимов В.А.*

e-mail: asas\_2001@mail.ru

Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Москва, Россия

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 составе используемой системы разработки. По мере развития горных работ под землей постепенно формируется и развивается 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. Именно в таком режиме с учетом конкретных горно-геологических условий месторождения и должна функционировать любая система разработки, используемая на шахтах и рудниках. Т.е. допускаются некоторые разрушения, не приводящие к полному коллапсу системы. 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. Отметим необходимые условия возникновения таких разрушений. Во-первых, в массиве в этом случае всегда можно выделить структурные элементы, которые играют роль «нагружающей системы» (в дальнейшем «система») и собственно «нагружаемый элемент» («элемент») в основном воспринимающий нагрузку. Например, целик и вмещающие горные породы. Либо, трещина контакта, в которой заполнитель и неровности берегов составляют «элемент», а собственно берега трещины – «систему». Во-вторых, рассматриваемые катастрофические разрушения всегда связаны с первоначальным разрушением «элемента» и последующими подвижками массива горных пород. При этом разрушающим фактором является потенциальная энергия горных пород, довольно быстро переходящая в кинетическую («нагружающей системы»). Смещения могут быть незначительными, порядка нескольких сантиметров, но плотность энергии велика из-за вовлечения в движение больших масс породы и выделения ее на относительно малых

«элементах». При этом она может реализоваться в виде разрушения в выработках на значительном расстоянии от «элемента». В-третьих, силовое взаимодействие «системы» и «элемента» должно происходить в режиме «мягкого» нагружения. В общем случае это означает, что в каком-то смысле деформационные характеристики «системы» и «элемента» должны обеспечивать более высокую податливость у «системы», чем у «элемента». «Система» и «элемент» деформируются совместно, т.е. должен выполняться принцип совместности деформаций, выражющийся, в частности, в непрерывности смещений на их общей границе. При этом в случае «мягкого» нагружения эти смещения определяются в основном деформационными свойствами «элемента», тогда как при «жестком» нагружении – свойствами «системы». Обычно при подготовке катастрофического явления и при его протекании массив горных пород деформируется таким образом, что «система» разгружается, т.е. ее деформации возрастают, а силовые факторы (скажем, напряжения) уменьшаются. При этом всегда существует некоторый параметр нагрузки. В этом качестве может выступать, скажем, протяженность выработанного пространства, изменяющаяся во времени. Либо расстояние от забоя выработки, приближающейся к разлому, до этого разрывного нарушения в массиве и т.д. в зависимости от горно-геологических и горнотехнических условий отработки. В тоже время для «элемента» имеет место нагрузжение, описываемое соответствующей диаграммой деформирования, в общем случае с запредельной ветвью. Отметим, что катастрофическое разрушение произойдет в точке на ниспадающей ветви диаграммы. Она характерна тем, что помимо равенства в ней силовых и деформационных факторов для «системы» и «элемента», в ней соблюдается равенство скоростей изменения этих факторов при нагружении для «системы» и «элемента».

---

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФЛЮИДОПОДВОДЯЩИХ РАЗЛОМОВ И ОЦЕНКА ИХ СОВРЕМЕННОЙ АКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ МОГТ И ГРАВИРАЗВЕДКИ НГП

<sup>1</sup>Трофимов В.А., <sup>2</sup>Волгина А.И., <sup>2</sup>Ефимов А.А.

e-mail: vatgeo@yandex.ru

<sup>1</sup>АО «Центральная геофизическая экспедиция», Москва, Россия

<sup>2</sup>ООО «НПО Геотон», Москва, Россия

Исследования последних лет показали, что месторождения углеводородов можно рассматривать как постоянно действующие гидродинамические системы [Муслимов и др., 2004], а флюидоподводящие разломы (каналы) – как части этих систем [Трофимов, Корчагин, 2002; Трофимов, 2006]. Прогнозирование этих каналов сейсморазведкой МОГТ и оценка их современной активности гравиразведкой НГП (нестабильности гравитационного поля) способствует повышению эффективности нефтепоисковых работ. Но это, хотя и очень важный, но не единственный результат выявления и изучения нефтеподводящих разломов. При определенных условиях активизация нефтеподводящего канала и подток глубинных флюидов могут создать давление, достаточное для прорыва и миграции углеводородов из ловушки через покрышку [Волгина и др., 2018]. В этом случае и над ловушкой могут образовываться миграционные каналы, а сам факт прорыва при проведении гравиметрических наблюдений фиксируется микросейсмами, иногда очень интенсивными. Такие каналы могут иметь сквозной характер, а глубинные углеводороды прорываться на дневную поверхность и создавать проблемы экологического характера. Одним из примеров тому могут быть известные провалы на Ямале. В докладе приводятся и обсуждаются результаты полевых экспериментов,

в том числе дискретных и непрерывных замеров гравитационного поля в течение длительного времени гравиметрами Scintrex. Подобием описываемому явлению прорыва глубинных газов в какой-то мере может быть грязевой вулканизм, когда в результате накопления газа и его прорыва через покрышку происходит извержение грязевых масс и газов, часто сопровождаемых водой и углеводородами. Прорывы газов к земной поверхности по трещиноватым ослабленным зонам, как и при грязевом вулканизме, сопровождаются сейсмическими явлениями и перемещением масс. Соответственно, при мониторинговых гравиметрических наблюдениях, каковыми является и гравиразведка НГП, мы можем наблюдать и сейсмическую составляющую («микросейсмы»), и изменения гравитационного поля, в том числе высокочастотные. Таким образом, полученные результаты вполне определенно свидетельствуют о возможности применения этого комплекса методов не только для повышения эффективности нефтепоискового бурения, но и для оценки перспективности выявленных сейморазведкой структур, и для прогнозирования современных проницаемых зон.

---

## **КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ БОРТОВ КАРЬЕРА**

*Трофимов В.А., Шиповский И.Е.*

ivev@i.ua

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия

Проблема обеспечения сохранности прибортовых массивов на карьерах на протяжении всего срока их эксплуатации требует постоянного совершенствования и соответствующей корректировки существующих методов оценки устойчивости карьерных откосов для предотвращения нежелательных катастрофических деформаций в горном массиве по мере развития горных работ, связанных с изменением профиля карьерной выемки. Вопросы определения параметров бортов карьера постоянно возникают в практических задачах горной инженерии и на протяжении многих десятилетий подробно рассматривались в работах отечественных и зарубежных ученых (Г.Л. Фисенко, Н.В. Мельникова, К.Н. Трубецкого, Б.П. Юматова, Б.Н. Байкова и многих других). Работы по укреплению откосов и упрочнению пород массивов в при-контурных зонах и сохранению целостности контурных массивов, оборке уступов и зачистке стали надежным звеном горного производства для обеспечения безопасности работ в карьерах и повышения полноты и качества извлечения запасов полезных ископаемых из недр, развитие и совершенствование которых является важной народнохозяйственной задачей. Возможное самообрушение пород борта карьера при определенных условиях может трактоваться как динамический переход системы из одного квазиравновесного состояния в другое под воздействием внутренних лавинообразно развертывающихся процессов в режиме триггерного эффекта. Такое преобразование происходит вследствие достижения в породе массива некоторого предельного состояния и инициируется некоторым пусковым сигналом, величина которого больше определенного допустимого уровня, связанного со строением и структурой горной породы и зависящего от степени ее напряженности. Особенностью процесса нарушения целостности карьера является достаточно быстрое развитие необратимой деформации и трещин в среде, находившейся изначально в упругом состоянии. Поэтому моделирование напряженно-деформированного состояния массива горной породы в классической постановке

чаще всего не выявляет инициализацию и развитие процессов разрушения, так как величина напряжений под действием сил гравитации около уступов и бортов карьеров 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 моделирование процессов выполнено для условий плоской деформации. Имитируется полная выемка массивного блока горной породы за короткий отрезок времени. Используется модель упруго–пластической деформации, параметры которой зависят от показателя накопления повреждений, определяемого по аппроксимации критерия Кулона–Мора, известной как соотношение Друккера–Прагера. Кроме того, применяемый численный метод слаженных частиц реализует двойственную модель представления повреждаемости геосреды, которая отражает разрыхление горной породы при выполнении заданного критерия разрушения и расхождение частиц материала при потере действия сил взаимосвязи, определяемых алгоритмом численного метода. Этот вычислительный подход позволил достаточно реалистично моделировать процессы развития деформаций и разрушения в окрестности уступов и бортов карьеров. В данной работе исследование процесса осуществляется с учетом механизма накопления повреждений, которое можно охарактеризовать как триггерный эффект в разрушении, поскольку, как показало моделирование, в рассматриваемых техногенных условиях такое накопление приводит к неустойчивым сдвиговым разрушениям и должно проявляться как динамическое событие. Этот факт подтверждает проведенные расчеты. Разрушение массива, подработанного выемкой крупного блока, представляет собой динамическое сдвижение, разрушение и фрагментацию горной породы под действием собственного веса всей нависающей толщи породы по высоте. Это динамическое сдвижение заканчивается обрушением породы на дно карьера. Процесс последовательной фрагментации, формирования крупных блоков и их динамического сдвижения объясняет системное проявление геодинамических явлений, проявляющихся в виде кластеров на сейсмограммах, полученных в размещенных в толще массива сейсмодатчика.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 18-05-00936).*

## **ГИДРОРАЗРЫВ ПЛАСТА И СОПУТСТВУЮЩАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ**

<sup>1,2,3</sup>*Турунтаев С.Б.,<sup>1</sup> Зенченко Е.В.,<sup>1</sup> Зенченко П.Е.,<sup>1</sup> Тримонова М.А.,*

<sup>1</sup>*Барышников Н.А.,<sup>3</sup> Рига В.Ю.*

*stur@idg.chph.ras.ru*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт, Москва, Россия

<sup>3</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики, Москва, Россия

Гидравлический разрыв пласта, осуществляемый путем закачки жидкости в заданный интервал скважины под давлением, превышающим прочность пород и минимальные напряжения, остается основным методом увеличения притока нефти к скважине. Несмотря на достаточно большую историю применения этого метода и существование большого количества расчетных пакетов программ, предназначенных для дизайна ГРП (симуляторов ГРП), нефтедобывающие и нефтесервисные компании зачастую сталкиваются с проблемами при проведении гидроразрыва, ряд из которых связан с недостаточной проработанностью физических моделей,

заложенных в расчетные программные пакеты. Развитие и усложнение этих моделей требует постановки новых экспериментов в лаборатории, позволяющих оценить вклад тех или иных факторов на развитие трещин ГРП. Побочным эффектом проведения работ по ГРП является появление сейсмических событий, индуцированных воздействием на подземные флюидные системы. С одной стороны, события малой магнитуды (микросейсмические события) используются как основной индикатор распространения трещин гидроразрыва, ее положения, геометрических размеров. С другой стороны, в ряде районов интенсивной разработки месторождений и массового применения ГРП отмечается многократное возрастание сейсмической активности и появление ощущимых землетрясений. В докладе приводится обзор данных по сейсмичности разного уровня, регистрируемой при проведении гидроразрыва пласта, результаты анализа возможностей сейсмического мониторинга для определения положения трещин ГРП, рассматриваются модели возникновения сейсмических событий при изменении порового давления. Приводятся результаты лабораторных экспериментов по моделированию ГРП в проницаемых средах, находящихся в условиях неравнокомпонентного напряженного состояния, рассматривается взаимодействие трещин ГРП, создаваемых в близких скважинах. Проведена серия экспериментов по созданию трещин ГРП с одновременной регистрацией акустической эмиссии (аналог сейсмических событий в реальных условиях) и измерением изменения параметров акустических импульсов, излучаемых с заданным интервалом, при прохождении через образец до и после образования трещин. Показано, что, в зависимости от соотношения вязкостей жидкости гидроразрыва и пластовой жидкости, следует ожидать разной информативности микросейсмического мониторинга и предполагать разные сценарии развития сейсмичности. Так, если вязкость жидкости ГРП существенно (в лабораторных экспериментах на два порядка) превышает вязкость пластовой жидкости, положение гипоцентров импульсов микросейсмической эмиссии соответствует положению трещины ГРП. Демонстрируются возможности использования моделей трения типа rate-state для оценки магнитуд возможных сейсмических событий.

---

## **РЕКОНСТРУКЦИЯ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ-ДЕФОРМАЦИЙ И ФЛЮИДОДИНАМИКИ РАЗЛОМНЫХ ЗОН НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА МИКРОСТРУКТУРНЫХ ИНДИКАТОРОВ**

**Устинов С.А., Петров В.А., Полузектов В.В.**

stevesa@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия

Одной из основных задач тектонофизики является реконструкция полей напряжений-деформаций (ПНД) различных рангов и их параметров. Для её решения применяются методы структурного, дислокационного и квазипластического анализа напряжений. Кроме того, крайне важно восстановить последовательность изменения параметров ПНД. Часто, с учетом возможностей применяемых методов, данная задача оказывается нерешаемой. В российской геологической науке для реконструкции параметров ПНД массивов горных пород, изучения структур рудных полей и месторождений была разработана и применялась методика микроструктурного анализа. Однако использование рассматриваемого анализа, из-за крайней сложности его проведения с технической точки зрения,

необходимости сбора и обработки большого объёма информации, а также отсутствия иных независимых методов верификации полученных результатов, практически прекратилось. В настоящее время в тектонофизике для решения задачи реконструкции параметров неоднородного ПНД всё чаще делается акцент на изучении трещин и микротрещин в ориентированных образцах горных пород, измерении их геометрических параметров и анализе минерального выполнения. Новый подход получил название «специальная методика микроструктурного анализа» (СММА). Полученные с её помощью результаты позволяют делать выводы о последовательности образования структур, выявлять этапы тектонических движений, восстанавливать пути миграции флюидов в трещинном пространстве горной породы, реконструировать параметры ПНД, связанные с конкретным тектоническим этапом. Реализация СММА автоматизирована авторами на основе разработки оригинального программного модуля, интегрированного с ГИС. В СММА изучаются все типы микроструктур в горных породах (открытые и минерализованные микротрещины, микробрекчи, ориентировка минеральных зерен и т.д.), но в качестве достоверных индикаторов неоднородности ПНД рассматриваются планарные системы флюидных включений (ПСФВ). Пространственная ориентировка каждой генерации ПСФВ напрямую зависит от параметров действовавшего на момент её формирования ПНД. Поэтому исследования ПСФВ в сочетании с детальным комплексным изучением других типов систем микроструктур можно использовать для восстановления этапов деформаций и проницаемости пород, реконструкции геометрии путей миграции флюидов, установления динамики изменения термобарических и физико-химических условий, связанных с определёнными этапами деформации геологических тел. Возможности СММА в сочетании с прецизионными методами анализа минерального вещества были опробованы на урановом месторождении Антей, расположенном в юго-восточном Забайкалье. В результате чего в истории формирования месторождения впервые установлены три структурных эпизода, характеризующихся различными параметрами ПНД, что привело к формированию определённого набора генераций микроструктур, выступавших в роли флюидопроводящих каналов в рамках гидротермального процесса. На основе детального анализа микроструктур проведён расчёт фильтрационных характеристик пород для палео- и современных условий.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-00109.*

## **ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ, ВЫДЕЛИВШЕЙСЯ В МАГМАТИЧЕСКОЙ ПРОВИНЦИИ ДЕКАН В РЕЗУЛЬТАТЕ УДАРА АСТЕРОИДА В МЕКСИКАНСКИЙ ЗАЛИВ НА К-PG ГРАНИЦЕ**

**Хазинс В.М., Шувалов В.В.**

khazins@idg.chph.ras.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

Согласно одной из гипотез [1] удар десятикилометрового тела в Мексиканский залив (кратер Чиксулуб) не является основной причиной массового вымирания на границе мелового и палеогенового (К-Pg) периодов. Однако удар может рассматриваться как спусковой механизм усиления вулканической активности в конце основной стадии извержений в магматической провинции Декан (Индия), отдаленной от кратера Чиксулуб примерно на 13000 км. В качестве механизма рассматривается выделение сейсмической энергии в области мантийного плюма. В соответствии с [1] для стимуляции вулканических процессов в магматической провинции

объемная плотность энергии должна быть порядка  $0.1\text{--}1.0 \text{ Дж}/\text{м}^3$ . Указанный диапазон энергий обосновывается как наблюдательными данными по извержению вулканов, инициированных землетрясениями, так и результатами 3-D численного моделирования сейсмических процессов, развивающихся при ударе десятикилометрового тела. Для расширения представлений об энергетическом балансе в области распространения сейсмических возмущений мы предложили способ оценки объемной плотности энергии, вносимой источниками различной магнитуды на различных расстояниях. Метод оценки включает ряд формул, скомпилированных из различных литературных источников. Входным параметром является магнитуда, которая напрямую зависит от энергии сейсмического возмущения, т.е. необходимо определить коэффициент преобразования «к» кинетической энергии космического тела в сейсмическую (сейсмическая эффективность). Согласно недавним лабораторным исследованиям и теоретическим исследованиям авторов настоящей работы среднее значение «к» составляет 0.001. Теоретические оценки обоснованы численными расчетами распространения в грунте ударных волн, инициированных как ударом кратерообразующих космических тел, так и подземными взрывами. Было показано, что при определении сейсмического эффекта кратерообразующих ударов можно пользоваться оценками сейсмической эффективности, полученными при проведении подземных взрывов, уменьшая их в 3–5 раз. Для подземных взрывов сейсмическая эффективность определена с хорошей точностью и, практически, не зависит от энергии взрыва. Для взрыва в граните сейсмическая эффективность составляет  $(1\text{--}3)\times 0.01$ . С учетом состава грунта мы положили среднее значение «к» равным 0.001. При этом условии оценка объемной плотности энергии, переносимой в результате формирования кратера Чиксулуб, приводит к значениям, попадающим в диапазон  $0.1\text{--}1.0 \text{ Дж}/\text{м}^3$  на расстояниях от 10000 до 15000 км. Однако проведенный нами анализ данных, использованных [1], показывает, что только для умеренных магнитуд (меньше чем 6) плотность энергии в среднем попадает в диапазон  $0.1\text{--}1.0 \text{ Дж}/\text{м}^3$ . Для магнитуд 7–8 плотность энергии, в среднем, на порядок выше. Если же воспользоваться нашей оценкой для магнитуд не превышающих 8, то все наблюдательные данные попадают в диапазон  $10\text{--}100 \text{ Дж}/\text{м}^3$ . Ни оценки, ни расчеты не предсказывают столь высоких значений плотности энергии при ударе 10 км астероида на расстояниях, превышающих 10000 км от точки удара.

*Работа выполнена в рамках программы РАН (проект № 0146-2018-0005).*  
Литература

1. Richards M.A. et al. 2015. GSA Bulletin 127(11-12): 1507–1520.

---

## НОВЫЕ МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА ТРИГГЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ В ЗЕМНОЙ КОРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ТЕОРИЙ

<sup>1</sup>Хачай О.А., <sup>2</sup>Хачай О.Ю.

e-mail: olgakhachay@yandex.ru

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург, Россия

В настоящее время интерес к изучению процессов, происходящих на других планетах, окружающих Землю не только на Земле, становится все более актуальным. Луна-спутник планеты является самой близкой к планете Земля, и

поэтому имеет смысл организовать систему для ее изучения в первую очередь, включающую самые передовые представления о физике процессов в горных массивах, которые также используются в земных условиях. В данной статье изложены новые идеи по организации сейсмологического и деформационного мониторинга, основанные на результатах, полученных для горных массивов Земли, и теоретических идеях, представленных в работах И. Пригожина и С. Хокинга. В последние десятилетия родилась новая наука – физика неравновесных процессов, связанных с такими понятиями, как необратимость, самоорганизация и диссипативные структуры. Известно, что необратимость приводит ко многим новым явлениям, таким как образование вихрей, вибрационные химические реакции, пусковые эффекты лазерного излучения в нестабильных массивах. Необратимость играет значительную конструктивную роль. Невозможно представить жизнь в мире, лишенном взаимосвязей, созданных необратимыми процессами. Прототипом универсального закона природы является закон Ньютона, который можно кратко сформулировать следующим образом: ускорение пропорционально силе. Этот закон имеет две фундаментальные особенности. Он является детерминированным: поскольку начальные условия известны, мы можем предсказать движение. И это обратимо во времени: нет разницы между предсказанием будущего и восстановлением прошлого; движение в будущее состояние и обратное движение из текущего состояния в начальное состояние эквивалентны. Закон Ньютона лежит в основе классической механики, науки о движении вещества, траекторий. С начала XX века границы физики значительно расширились. Теперь у нас есть квантовая механика и теория относительности. Но, как мы увидим в дальнейшем, основные характеристики закона Ньютона – детерминизм и обратимость во времени – сохраняются. Можно ли изменить саму концепцию физических законов, чтобы включить в наше фундаментальное описание природы необратимости, событий и стрелы времени? Принятие такой программы влечет за собой тщательный пересмотр нашей формулировки законов природы, и это стало возможным благодаря замечательным успехам, связанным с идеями нестабильности и хаоса. Возвращаясь к результатам, полученным для неустойчивого горного массива, можно отметить, что мониторинговые исследования должны проводиться в активном режиме, т.е. должен быть источник возбуждения (сейсмический или другой природы), а реакция горных массивов регистрируется. в течение не очень длительного времени эффект должен повторяться, и для этого процесса, в результате, могут быть построены фазовые диаграммы массивов горных пород.

---

## ФЛЮИДОДИНАМИКА В МНОГОРАНГОВЫХ СОСТАВНЫХ ИЕРАРХИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ С РАЗЛИЧНЫМИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

<sup>1</sup>Хачай О.А., <sup>2</sup>Хачай А.Ю.

olgakhachay@yandex.ru

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геофизики им. Ю.П.Булашевича Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург, Россия

Предложен метод активного картирования и мониторинга гетерогенной сложно построенной двухфазной среды, который может быть использован при управлении добычей вязкой нефти в шахтных условиях и легкой нефти в субгоризонтальных скважинах. Требования эффективного по экономическим показателям и наиболее полного извлечения углеводородов на месторождениях диктует

необходимость создания новых геотехнологий освоения месторождений нефти и газа, основанных на фундаментальных достижениях в области геофизики и геомеханики. Разработан новый 2D алгоритм моделирования для дифракции звука на пористых влагонасыщенных включениях иерархической структуры, перемежаемых пластическими или упругими пропластками и расположенных в J-ом слое N-слойной упругой среды. Построен алгоритм с учетом возможности перемещения иерархических включений из слоя в слой с течением времени. Если нефть обладает еще и аномальной вязкостью, для выбора частотного наполнения акустического воздействия на область резервуара, заполненного этой нефтью, необходимо использовать результаты моделирования в иерархических средах с использованием разработанных алгоритмов. Использован метод фазовых диаграмм для оценки отклика флюидонасыщенного массива на внешнее активное воздействие, изменения состояния массива, связанного со структурными его перестройками. По данным каротажа сейсмоакустической эмиссии отмечено различие в насыщенности пласта по разрезу скважины. Положительная динамика САЭ после акустического воздействия связана с реакцией области пласта, насыщенного нефтью, а отрицательна с водой. Только один интервал пласта 2625–2630 метров дал положительную динамику вызванной акустической эмиссии и может рассматриваться как перспективный на нефтеотдачу. Результаты по двум методам обработки совпали, однако метод фазовых диаграмм дал более подробную информацию о различии возможной нефтеотдачи внутри области пласта, что более соответствует геологической информации. Эти результаты являются основой для построения новых систем картирования и мониторинга геологических систем. Особенно это востребовано для картирования нефтегазовых месторождений и прогноза их эффективной отдачи.

---

## **ГЕОМАГНИТНАЯ СОПРЯЖЕННОСТЬ МЕЖДУ ЮЖНОЙ ГРАНИЦЕЙ ЛИТОСФЕРНОЙ ПЛИТЫ НАЦКА И СЕВЕРНЫМИ ГРАНИЦАМИ ПЛИТ КОКОС И КАРИБСКАЯ: ВОЗМОЖНОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО ЭКЗОГЕННОГО ИНИЦИРОВАНИЯ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЗЕМНОЙ КОРЕ**

**Хачикян Г.Я.**

galina.khachikyan@gmail.com

Институт ионосферы Акционерного общества «Национальный центр космических исследований и технологий», Алматы, Казахстан

Несколько лет назад было показано [1], что граница Антарктической литосферной плиты в южном полушарии геомагнитно сопряжена с зоной сочленения платформ и орогенов в северном полушарии. При этом обнаружилось, что геомагнитная сопряженность проявляется наиболее ярко между южной границей литосферной плиты Нацка и северными границами плит Кокос и Карибская. Эти плиты расположены вблизи территории Бразильской магнитной аномалии, над которой внутренняя граница радиационного пояса Земли существенно понижена, и над которой уже в начале 80-х годов прошлого столетия были обнаружены стационарные потоки высокоэнергичных электронов с помощью аппарата на орбитальных станциях «Салют-6», «Салют-7», «Мир», а также на искусственных спутниках Земли серии «Метеор-3» [2 и ссылки внутри]. Было установлено, что в радиационном поясе существует стабильный пояс электронов высокой энергии ( $E \geq 20$  МэВ) вокруг геомагнитных силовых линий  $L = 1.2\text{--}1.5$  [2]. В настоящем докладе показано, что эпицентры землетрясений,

расположенные вдоль южной границы литосферной плиты Нацка и вдоль северных границ плит Кокос и Карибская приурочены к основанию в земной коре именно этих геомагнитных силовых линий с  $L = 1.2\text{--}1.5$ , заселенных высокоэнергичными электронами. Результат получен на базе данных глобального сейсмологического каталога NEIC Национальной геологической службы США с 1973 г. по настоящее время (более 200 тысяч событий с магнитудой  $M \geq 4.5$ ). Для каждого эпицентра был рассчитан параметр  $L$  с использованием компьютерных кодов программы GEOPACK [<http://geo.phys.spbu.ru/~tsyganenko/Geopack-2008.html>]. Гистограмма распределения количества землетрясений в зависимости от  $L$  показала дополнительно [3], что их количество относительно повышенено в основании геомагнитных силовых линий  $2.1 \leq L \leq 2.25$ , вокруг которых в радиационном поясе сформировано кольцо повышенной радиации за счет захвата аномальных космических лучей, и относительно понижено в основании геомагнитных линий  $3.3 \leq L \leq 3.7$ , которые приходятся на переходную область между внутренней и внешней частями радиационного пояса и слабо заселены заряженными частицами. Также обнаружено, что формирование в радиационном поясе новых квазистационарных колец повышенной радиации после геомагнитных бурь, например, вокруг  $L \sim 2.6$  после бури 24 марта 1991 г., обнаруженного космическими аппаратами «CRESS» и «Мир», как отмечено в [2], или вокруг  $3.0 \leq L \leq 3.5$  после магнитной бури 3 сентября 2012 г., обнаруженного спутником «Van Allen Probes» [4], сопровождалось спустя примерно два месяца усилением сейсмической активности в регионах, пронизанных геомагнитными линиями дополнительных квазистационарных радиационных поясов. Обсуждается возможная причина усиления сейсмической активности в основании в земной коре геомагнитных силовых линий обильно заселенных заряженными частицами в радиационном поясе Земли.

#### Литература

1. *Khachikyan G.Ya., Zhakupov N.S., Kadyrkhanova N.Zh.* Geomagnetic conjugacy of modern tectonic structures // *Geodynamics and Tectonophysics*. 2013. 4(2), P. 187–195. <http://gt.crust.irk.ru/images/upload/tblarticle106/magazin106.pdf>
2. *Galper M.A.* Earth radiation belt // *Soros Educational Journal*. 1999. № 6. Электронный ресурс: [www.eduhmao.ru/var/db/files/3456.9906\\_075.pdf](http://www.eduhmao.ru/var/db/files/3456.9906_075.pdf)
3. *Khachikyan G., Inchin A., Zhumabayev B., Toyshiev N., Kairatkyzy D.* Some correspondence between dynamics of radiation belt and seismic activity // *The EGU General Assembly*. 7-12 April 2019. Vienna (Austria). Vol. 21, EGU2019-3406.pdf.
4. *Thorne R.M., et al.* Evolution and slow decay of an unusual narrow ring of relativistic electrons near  $L \sim 3.2$  following the September 2012 magnetic storm // *Geophys. Res. Lett.* 2013, V. 40. P. 3507–3511.

---

## ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ В ГОРНОМ МАССИВЕ В ОКРЕСТНОСТИ ГЛУБОКИХ ВЫРАБОТОК

*Ци Ч.*

qichengzhi65@163.com

Пекинский университет гражданского строительства и архитектуры, Пекин, Китай

Горные породы обладают реологическими свойствами. Наглядным примером может служить деформация и разрушение породного массива в форме медленной деформационной волны вблизи горных выработок на руднике Артем (Дальний Восток, Россия) [1]. Медленную деформационную волну наблюдали на никелевом руднике Jinchuan и железорудном руднике Zhangjiawa (Китай) [2]. Лабораторные эксперименты на щелочно-галоидных кристаллах ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{LiF}$ ), мраморе,

песчанике, сильвините указывают на наличие медленной деформационной волны [3]. Распространение медленных деформационных волн – обычное природное явление. К ним относятся волна тектонических напряжений [4], миграция корковой деформации [5], волны маятникового типа [6], сбросовые деформационные волны [7], медленные деформационные волны в породном массиве [8], медленные волны вращения в геосреде, состоящей из вращающихся блоков [9]. Деформационные волны могут инициировать землетрясения [10]. Запредельное деформирование можно рассматривать как непрерывный фазовый переход. В данном докладе распространение деформационных волн в породе вблизи выработок глубокого залегания рассмотрено на базе модели непрерывного фазового перехода [11] в рамках лагранжева формализма [12]. Относительная деформация сдвига взята в качестве параметра порядка. Потенциальная энергия получена по аналогии с расширением Гинзбурга–Ландау для свободной энергии. Вариационный принцип Гамильтона использован для получения уравнения движения, приемлемого для моделирования нескольких типов деформационных волн. Утверждается, что на основе этого подхода возможно моделировать различные деформационные волны.

#### Литература

1. Guzev M.A., Makarov V.V. Deformation and failure of the high stressed rocks around openings, Dalnauka, Vladivostok, 2007. – 232 p.
2. Fang Zulie. The maintenance of soft rock tunnels and their control measurements, in: The supporting theory and practice for soft rock tunnels in coal mines in China, China University of Mining and Technology, Xuzhou, China, 1996, 64–69.
3. Zuev L.B. et al. Laboratory observation of slow movements in rocks, J. Appl. Mech. Tech. Phys., 2012, 53(3): 467–470.
4. Nikolaevsky V.N. Geomechanics and fluidodynamics, Kluwer Academic Publishers, London, 1996.
5. Kasahara K. Migration of crustal deformation, Tectonophysics, 1979, 52(1 - 4): 329–341.
6. Kurlenya M.V., Oparin V.N., Vostrikov V.I. Pendulum-type waves. Part I: State of the problem and measuring instrument and computer complexes, J. Mining Sci., 1996, 32(3): 159–163.
7. Bykov V.G. A model of unsteady-state slip motion on a fault in a rock sample, Phys. Solid. Earth. 2001, 37(6): 484–488.
8. Gershenson N.I., Bykov V.G., Bambakidis G. Strain waves, earthquakes, slow earthquakes, and afterslip in the framework of Frenkel- Kontorova model, Phys. Rev. E., 2009, 79. 056601.
9. Vikulin A.V. Geodynamics as wave dynamics of the medium composed of rotating blocks, Geodyn. Tectonophys, 2015, 6 (3): 345–364.
10. Sherman S.I. Deformation waves as a trigger mechanism of seismic activity in seismic zones of the continental lithosphere. Geodyn. Tectonophys, 2013, 4 (2): 83–117.
11. Landau L.D. On the theory of phase transition, J. Exp. Theor. Phy., 1937, V. 7. 627–632.
12. Landau L.D., Lifshitz E.M. Mechanics, Pergamon, Press, London, 1969.

---

## СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ НАНО-ЗАЩЕМЛЕННОЙ ВОДЫ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ: ПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ ТРИГГЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ В ЗОНАХ СУБДУКЦИИ

**Цуканов А.А., Шилько Е.В., Псахье С.Г.**

a.a.tsukanov@yandex.ru

ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

Вода является одним из наиболее распространенных соединений в земной коре. В зонах субдукции захваченная в наноразмерных порах гидрофильных океанических минералов вода может увлекаться до глубин верхней мантии и переходной

зоны. В нанозащемленном состоянии вода проявляет отличающиеся от свободного объемного состояния свойства, особенно при экстремальных термодинамических условиях субдуцируемой плиты. Структура и свойства стенки нанопоры на молекулярном уровне являются значимыми факторами, определяющими структуру и свойства нанозащемленной воды, включая ее фазовые трансформации с ростом литостатического давления. Фазовые превращения нанозащемленной воды, которые сопровождаются резким, скачкообразным изменением ее механических свойств, а значит и свойств всего водонасыщенного минерала, могут быть потенциальным механизмом триггерных эффектов в зонах субдукции. В настоящей работе на молекулярном уровне исследованы структура и фазовые трансформации нанозащемленной воды в модельных минералах с гидрофильной и гидрофобной поверхностью в диапазоне давлений до 10 ГПа. С использованием метода молекулярной динамики показано, что дипольный заряд поверхности нанопоры существенным образом влияет на физические свойства нанозащемленной воды в рассмотренном диапазоне давлений. В частности, для ограниченной воды в нанопоре с гидрофильными стенками наблюдалось фазовое превращение из жидкой фазы в ГПУ кристалл при давлении 3.0 ГПа и переход из ГПУ в ГЦК решетку при 6.7 ГПа. В то же время вода в искусственном гидрофобном минерале со схожей атомной структурой, но значительно сниженным парциальным зарядом на атомах минерала, ведет себя совершенно иначе: вода не образует ГПУ решетку и трансформируется непосредственно из жидкой фазы в фазу с ГЦК упаковкой при давлении 3.0 ГПа. Эти фазовые трансформации воды в нанопорах минералов сопровождаются скачкообразным обратимым увеличением сжимаемости воды до 1.0–1.5 порядков. Такие сильные переходные изменения в сжимаемости воды могут вызвать значительные изменения в эффективной жесткости водосодержащей породы и могут быть триггером динамического разрыва и сопутствующих сейсмических эффектов.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-11-01232). Расчеты выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова.*

---

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПРИЛИВНЫХ СИЛ В КАЧЕСТВЕ ТРИГГЕРА МАЛОГЛУБИННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

**Чубаров Д.Л., Немирович-Данченко М.М.**

convert008@mail.ru

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

Исследование механизмов возникновения землетрясений на сегодняшний день является одной из наиболее широко освещенных областей фундаментальной геофизики. Ежегодно службами мониторинга по всему миру фиксируется около двух тысяч землетрясений с магнитудой более 5 по шкале Рихтера, а их жертвами становятся десятки тысяч человек. Таким образом, актуальность изучения механизмов возникновения землетрясений не вызывает сомнений. Значительная часть работ последних лет посвящена исследованию взаимодействия геофизических полей, воздействия различных полей на приразломные области. И вследствие повышения количества таких работ (при должном их качестве) мы будем иметь возможность снизить потенциальный ущерб от землетрясений. В данной работе изучается роль приливных сил, действующих на земную кору со стороны Луны и Солнца,

которые, согласно некоторым гипотезам, могут играть роль триггера при подготовке землетрясений. Цель работы – установить взаимосвязь между действием приливных сил и сильными малоглубинными землетрясениями. Выборка землетрясений включает в себя более 3000 малоглубинных ( $h < 30$  км) событий с магнитудой выше 5, произошедших за последние 10 лет. Анализ влияния приливных сил на землетрясения производился посредством расчета времени между последним пиком приливного горба, прошедшим через точку эпицентра землетрясения и моментом толчка. Далее это время сравнивалось с общим времененным интервалом между прохождением двух последовательных приливных горбов. Очевидно, что если землетрясение происходит в случайный момент времени, никакой закономерности в распределении времени между последним приливным горбом и моментом толчка наблюдаться не будет. При этом, если поставленная гипотеза верна, момент толчка будет тяготеть ко времени последнего прохождения пика приливного горба. Стоит так же учитывать тот факт, что приливные силы действуют на разные участки Земли неравномерно. На экваторе это действие наибольшее, на полюсах – наименьшее. Таким образом, было бы некорректно исследовать землетрясения, предварительно не разделив их по широтному признаку. В результате проведения данного исследования было определено, что в средних широтах (приблизительно до  $40^{\circ}$  южной и северной широты) около 85% толчков приходится на первые 10% времени после прохождения точки эпицентра приливным горбом. С отдалением от экватора эти цифры меняются, и в полярных широтах приблизительно 80% толчков приходится на первые 40% времени. Таким образом, можно заключить, что в рамках данной выборки землетрясений и поставленных условий для землетрясений в центральных широтах гипотеза о триггерном эффекте приливных сил подтверждается.

---

## ЗАКОН ПРОДУКТИВНОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

<sup>1</sup>Шебалин П.Н., <sup>2</sup>Баранов С.В., <sup>3</sup>Нартю К.

p.n.shebalin@gmail.com

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Кольский филиал Федерального исследовательского центра Единая геофизическая служба РАН, Апатиты, Россия

<sup>3</sup>Парижский Институт физики Земли, Париж, Франция

Одним из важнейших свойств сейсмичности является группирование в пространстве и времени, которое проявляется в виде афтершоков, форшоков, роев землетрясений. Такие связанные между собой события составляют значительную долю всех сейсмических событий. Многими авторами было исследовано множество механизмов перераспределения напряжений и динамического триггеринга землетрясений для объяснения наблюдавшихся последовательностей. Тем не менее, такие механизмы по-прежнему не могут в полной мере объяснить причинные связи между событиями. В данной работе для каждого землетрясения мы вводим параметр «продуктивность землетрясения», определяемого как размер спровоцированного им локального кластера сейсмических событий в области пространства, времени и магнитуды. Локальный кластер связан лишь с одним землетрясением-триггером, а каждый элемент кластера в свою очередь является триггером для локального кластера следующего уровня иерархии. Кластер может состоять из одного события. Мы демонстрируем, что продуктивность не зависит от магнитуды землетрясения и аналогично магнитуде следует закону

экспоненциального распределения. Средний размер локального кластера является оценкой единственного параметра этого распределения. Мы показываем, что этот параметр практически не зависит от уровня иерархии, но существенным образом зависит от глубины, демонстрируя тем самым возможность служить индикатором напряженного состояния среды. Показано также, что выбор функции близости [Baesi, Paschucky, 2004; Zaliapin, Ben-Zion, 2013; Savage, 1972], с помощью которой определяется, к какому именно землетрясению-триггеру относятся последующие сейсмические события, не оказывает влияния на форму распределения продуктивности землетрясений.

*Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты №№ 17-05-00749 и 19-05-00812).*

## РОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ДЕСТРУКЦИИ ГОРНЫХ ПОРОД ПОД ВЛИЯНИЕМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

<sup>2</sup>**Щербаков И.П.,<sup>1,2</sup> Веттегрен В.И.,<sup>1,2</sup> Мамалимов Р.И.,<sup>1</sup> Пономарев А.В.**

Victor.Vettegren@mail.ioffe.ru

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

В последние годы было установлено, что под действием ударных волн поверхность пород испаряется с вылетом электронно-возбужденных положительно заряженных ионов и электронов. Какова же роль механических напряжений в деструкции пород, подвергаемых воздействию ударных волн? Для ответа на этот вопрос нами были сконструированы и построены 2 установки: первая позволяет регистрировать спектры люминесценции горных пород под действием ударных волн, а вторая – регистрирует временные зависимости сигналов люминесценции одноосно сжатых образцов горных пород с временным интервалом 2 нс. Исследуемые образцы были приготовлены из кварца, аляскита, плагиогранита и габро-диабаза. Каждый из них представлял собой параллелепипед с размерами ребер 4x4x6 см. Внутри него вырезан паз, в который вставлены медные электроды, присоединенные к конденсатору. При его разряде между электродами возникала дуга. Ее появление вызывало образование ударной волны в воздухе и вслед за ней – в образце. Когда волна в образце добегала до поверхности, противоположной разряду, она начинала испаряться – из нее вылетала струя плазмы, состоящей из электронно-возбужденных, положительно заряженных ионов и электронов. При релаксации возбуждения возникала люминесценция, спектры и временные зависимости, которые регистрировались нашими установками. Известно, что кристаллы содержат дислокации, которые могут двигаться по плоскостям скольжения. В местах пересечения плоскостей создаются «стопоры», препятствующие движению дислокаций. В стопорах возникают сильные искажения кристаллической решетки, которые могут вызывать переходы между уровнями основного и возбужденного электронных состояний и спад кристаллических решеток на положительно заряженные ионы. Ударная волна «выносит» искаженные участки кристаллических решеток на поверхность, что позволяет возбужденным ионам вылетать с нее. При выносе на поверхность должны появляться дефекты в виде канавок, глубина которых может достигать 1 мкм и более. Такие дефекты действительно наблюдались нами в оптический микроскоп. Нас заинтересовал вопрос: как влияет сжимающее напряжение на вылет струй ионов? Оказалось, что когда их величина напряжений меньше ~ (0,92–0,95) от прочности образца, число и

интенсивность струй ионов при увеличении напряжения уменьшаются. Этот эффект обусловлен тем, что сжимающие напряжения препятствуют движению и пересечению дислокаций, а также их аннигиляции. Когда величина напряжений приближалась к прочности образца и в нем появлялась разрушающая трещина, интенсивность и число струй ионов резко увеличивались. Вероятно, напряжения в вершине трещины вызывают образование новых скоплений дислокаций, что и ведет к увеличению скорости деструкции поверхности исследованных образцов. В этом случае трещина играет роль триггера, вызывающего резкое увеличение интенсивности испарения ионов с поверхности горных пород.

Научное издание

V-я Международная конференция  
**ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ГЕОСИСТЕМАХ**  
(г. Москва, 4–7 июня 2019 г.)

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Компьютерная верстка: *B.B. Ежакова*

Дизайн обложки: к.ф.-м.н. *И.А. Ряховский*

Фото: *Ryan Schroeder*,

[https://unsplash.com/photos/Gg7uKdHFb\\_c](https://unsplash.com/photos/Gg7uKdHFb_c)

Подписано к печати 25.04.2019  
Формат 70×100<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная  
Гарнитура Times New Roman. Печать офсетная. Уч.-изд. л. 18,0.  
Тираж 300 экз.

Отпечатано в полном соответствии с представленным электронным оригинал-макетом  
в ООО «Графитекс»  
127018, Москва, Складочная, 6, стр. 4