

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ДИНАМИКИ ГЕОСФЕР ИМЕНИ АКАДЕМИКА М. А. САДОВСКОГО
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»
(МФТИ, ФИЗТЕХ)

VII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ГЕОСИСТЕМАХ

2–5 июля 2024 г., Долгопрудный

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Москва

УДК 550.3; 550.8; 551.2; 551.3

Триггерные эффекты в геосистемах: тезисы докладов VII Международной конференции (2–5 июля 2024 г., Долгопрудный, Московская область). М. : ИДГ РАН, 2024. – 141 с.

В сборнике содержатся тезисы докладов, представленных на VII Международной конференции «Триггерные эффекты в геосистемах» (2–5 июля 2024 г., Долгопрудный, Московская область). В тезисах отражены актуальные вопросы воздействия природных и антропогенных факторов на различные геосферы, геомеханические системы и техногенные объекты, находящиеся в субкритическом состоянии, а также влияние этих воздействий на систему «атмосфера-ионосфера».

ОРГАНИЗАТОРЫ:

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки ИНСТИТУТ ДИНАМИКИ ГЕОСФЕР
ИМЕНИ АКАДЕМИКА М. А. САДОВСКОГО РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИДГ РАН)**

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «МОСКОВСКИЙ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (МФТИ, Физтех)**

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

ЗАМ. ПРЕДСЕДАТЕЛЯ ОРГКОМИТЕТА: *Г. Г. Кочарян* – д.ф.-м.н., профессор, ИДГ РАН, *В. А. Баган* – к.ф.-м.н., МФТИ

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ОРГКОМИТЕТА: *А. А. Остапчук* – к.ф.-м.н., ИДГ РАН

Члены Оргкомитета:

Ю. А. Виноградов – д.т.н., ФИЦ ЕГС РАН

А. Д. Гвишиани – академик РАН, ГЦ РАН

Ж. Ш. Жантаев – д.ф.-м.н., Институт ионосферы (Казахстан)

В. В. Жмур – чл.-корр. РАН, ИО РАН

В. Н. Захаров – академик РАН, ИПКОН РАН

В. А. Зейгарник – д.т.н., ОИВТ РАН

К. Ч. Кожоголов – академик НАН КР, Институт геомеханики и освоения недр (Кыргызстан)

М. Г. Леонов – д.г.-м.н., ГИН РАН

Л. И. Лобковский – академик РАН, ИО РАН

П. М. Нагорский – д.ф.-м.н., ИМКЭС СО РАН

Л. А. Назарова – д.ф.-м.н., ИГД СО РАН

С. С. Негодяев – к.т.н., МФТИ

Н. Н. Михайлова – д.ф.-м.н., Казахстанский национальный центр данных (Казахстан)

E. Paradimitriou – профессор, Университет Аристотеля в Салониках (Греция)

В. А. Петров – чл.-корр. РАН, ИГЕМ РАН

В. В. Ружич – д.г.-м.н., ИЗК СО РАН

В. Б. Смирнов – д.ф.-м.н., МГУ

С. А. Тихоцкий – чл.-корр. РАН, ИФЗ РАН

С. Qi (Ци Чен Чжи) – д.ф.-м.н., Пекинский университет гражданского строительства и архитектуры (Китай)

Программный комитет:

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

М. В. Березникова – к.ф.-м.н., МФТИ

Л. М. Богомолов – д.ф.-м.н., ИМГиГ ДВО РАН

Д. И. Глуховец – к.ф.-м.н., ИО РАН

Ю. И. Зецер – д.ф.-м.н., ИДГ РАН

Д. Н. Локтев – к.ф.-м.н., ИДГ РАН – зам. председателя

А. Н. Ляхов – к.т.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

А. Л. Собисевич – чл.-корр. РАН, ИФЗ РАН

А. А. Спивак – д.ф.-м.н., ИДГ РАН

Н. Б. Степанова – к.ф.-м.н., МФТИ

А. В. Тащилин – д.ф.-м.н., ИСЗФ СО РАН

П. Н. Шебалин – чл.-корр. РАН, ИТПЗ РАН

Ответственные редакторы: академик РАН *В. В. АДУШКИН*, д.ф.-м.н. *Г. Г. КОЧАРЯН*

© ИДГ РАН, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ЗАПИСЕЙ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПРИ ПОМОЩИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ WAVELET SCATTERING И МЕХАНИЗМА ВНИМАНИЯ <i>И. А. Абзалилов, Н. А. Барышников</i>	11
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УЧАСТКОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ НА ТЕРРИТОРИИ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ПЛИТЫ <i>А. Ж. Ахметов</i>	12
МАКЕТ АППАРАТУРЫ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ТОЧНОЙ ПРИВЯЗКОЙ К МИРОВОМУ ВРЕМЕНИ <i>Н. С. Ачкасов</i>	13
ВЛИЯНИЕ ГАЗА В ПОРАХ НА ЛИНЕЙНОСТЬ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ СРЕДЫ ТИПА ПОРОД ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА <i>Н. А. Барышников, П. Е. Зенченко</i>	14
СЛОЙ ПРЕДЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ КАК ГЕОСФЕРА ЗЕМЛИ И СРЕДА ДЛЯ ТРИГГЕРНЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ <i>А. С. Батугин</i>	15
РОСТ ГЕОМАГНИТНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ В ЛЭП НА КОЛЬСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ И В КАРЕЛИИ ВО ВРЕМЯ СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ БУРЬ <i>В. Б. Белаховский, В. А. Пилипенко, Я. А. Сахаров, В. Н. Селиванов</i>	16
ОНЛАЙН СИСТЕМА TESLASWARM ДЛЯ АНАЛИЗА ТОКОВ В ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ SWARM И НАЗЕМНЫХ СТАНЦИЙ <i>И. О. Белов, В. А. Пилипенко, Д. В. Кудин</i>	17
МОНИТОРИНГ СЛАБОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ НА ЖЕЛЕЗОРУДНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ КУРСКОЙ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ <i>А. Н. Беседина, Г. Г. Кочарян</i>	18
ИНСТАНТНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ФОРШОК – АФТЕРШОКОВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ НА ПРИМЕРЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ САХАЛИНА <i>Л. М. Богомолов, М. В. Родкин, В. Н. Сычев</i>	19–20
НЕЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ВЗАИМОСВЯЗИ МАГНИТУДЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЛНИЙ В ТИХООКЕАНСКОМ РЕГИОНЕ <i>А. М. Бондаренко, Н. В. Ягова, Е. О. Макаров</i>	21–22
ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗОНЫ ВЛИЯНИЯ СЕЙСМОГЕННОГО РАЗЛОМА В РЕЗУЛЬТАТЕ ДИНАМИЧЕСКОГО СДВИГА <i>А. М. Будков, Г. Г. Кочарян</i>	23
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МЕЛКИХ МЕТЕОРНЫХ ТЕЛ: ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОТЫ АБЛЯЦИИ <i>А. И. Бушманова, В. В. Ефремов, О. П. Попова, Д. О. Глазачев, А. П. Карташова</i>	24
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕРЫ СНИЖЕНИЯ ОПАСНОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ГОРНЫХ УДАРОВ НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ КИТАЯ <i>Ван Цжизян</i>	25
К УПРАВЛЕНИЮ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВЗРЫВНОЙ ОТБОЙКЕ <i>С. Д. Виктор, В. М. Закалинский, И. Е. Шиповский, Р. Я. Мингазов</i>	26
АНАЛИЗ ЕСТЕСТВЕННОЙ ТРЕЩИНОВАТОСТИ В ПОРОДАХ КОЛЛЕКТОРАХ ОДНОГО ИЗ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОДНОМЕРНОГО ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ <i>И. А. Воронов, Н. В. Дубиня</i>	27

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЙОНЕ СЕВЕРО-КОРЕЙСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА ПУНГЕРИ <i>И. П. Габсатарова, И. Н. Соколова</i>	28
АНТРОПОГЕННЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ИОНОСФЕРУ ЗЕМЛИ <i>Г. В. Гивишвили</i>	29
КАЛЬКУЛЯТОР ОЦЕНКИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТОЛКНОВЕНИЙ АСТЕРОИДОВ И КОМЕТ С ЗЕМЛЁЙ <i>Д. О. Глазачев, О. П. Попова, Е. Д. Подобная, В. В. Шувалов, В. В. Светцов, Н. А. Артемьева, В. М. Хазинс</i>	30
ВАРИАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ «ПЛАСТ-СКВАЖИНЫ» ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КМА <i>Э. М. Горбунова, А. Г. Иванов, С. М. Петухова, А. В. Караваев, А. Ю. Федоров</i>	31
КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСА ПРЕДВЕСТНИКОВ ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ КАМЧАТКИ <i>О. Е. Графеев</i>	32
ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ: ОБЗОР И КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ <i>Г. А. Гридин, В. А. Новиков</i>	33
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ РАЗЛОМА ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КАНТОРА РАЗМЕРОВ ПЯТЕН АСПЕРИТИ В 1D ПОСТАНОВКЕ <i>Г. А. Гридин, А. А. Остапчук</i>	34
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ НА ИЗМЕНЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА ПРИ ПОМОЩИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА В РАЙОНЕ ЦЕНТРАЛЬНО-САХАЛИНСКОГО РАЗЛОМА <i>С. А. Гуляков, И. П. Дудченко, Л. М. Богомолов, Д. В. Костылев, Н. В. Костылева, Н. С. Стовбун</i>	35
ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОТРЕЩИН В ПРОЦЕССЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД: РЕНТГЕНОВСКАЯ МИКРОТОМОГРАФИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ <i>Е. Е. Дамаскинская, В. Л. Гиляров, Д. И. Фролов, Ю. С. Кривоносов, А. В. Бузмаков, В. Е. Асадчиков</i>	36–37
ЧТО ВЗВОДИТ ТРИГГЕРЫ? <i>В. И. Данилов</i>	38
ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСЕТИНСКОГО СЕКТОРА БОЛЬШОГО КАВКАЗА В ЗАДАЧАХ СИСТЕМНОЙ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ <i>Б. А. Дзевоев, А. Д. Гвишиани, В. Н. Татаринев, В. И. Кафтан, А. И. Маневич, Б. В. Дзеранов, Р. В. Шевчук, Д. Ж. Акматов, И. В. Лосев</i>	39–40
О МИКРОТРЕЩИНАХ В МИНЕРАЛАХ КАК ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ТРИГГЕРАХ РАЗРЫВОВ <i>Н. И. Дьяур, А. В. Чистякова, Т. Э. Багдасарян</i>	41
ПРОГНОЗ ПОВЕДЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРУЕМОГО СОСТОЯНИЯ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ПОМОЩИ РЕКУРРЕНТНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ <i>Н. А. Егоров</i>	42
НОВЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОЧАГОВЫХ ЗОН СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ <i>А. Г. Епифанский, И. Н. Соколова, И. П. Габсатарова</i>	43
ИНДЕКС МАСС МЕТЕОРНЫХ ПОТОКОВ ПЕРСЕИД, ОРИОНИД И ГЕМИНИД <i>В. В. Ефремов, О. П. Попова, Д. О. Глазачев, А. П. Карташова</i>	44
ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ НА ОСНОВЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГРАДИЕНТНОГО ТИПА <i>Д. С. Журкина, С. В. Лавриков, А. Ф. Ревуженко</i>	45

ЭПОХА ОМОРИ – ЧТО ДАЛЬШЕ? <i>А. Д. Завьялов, А. В. Гульельми, О. Д. Зотов, Б. И. Клайн</i>	46
ВЛИЯНИЕ ПРЯМОГО ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ В ОДНООСНОСЖАТЫХ ОБРАЗЦАХ <i>В. А. Зейгарник, В. Н. Ключкин, В. А. Новиков, В. И. Окунев</i>	47
КРУГОСВЕТНОЕ СЕЙСМИЧЕСКОЕ ЭХО КАК ТРИГГЕР ТЕКТОНИЧЕСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ <i>О. Д. Зотов, А. В. Гульельми</i>	48
УДАРНЫЕ КРАТЕРЫ НА ЗЕМЛЕ БОЛЬШЕ НАБЛЮДАЕМЫХ <i>Б. А. Иванов</i>	49
ПОСЛЕДСТВИЯ ТЕХНОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РЕЛЬЕФ <i>Г. Н. Иванченко, Э. М. Горбунова</i>	50
ТЕРМИЧЕСКИ СТИМУЛИРОВАННАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ И МИКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ <i>Г. С. Индаков, П. А. Казначеев, З.-Ю. Я. Майбук, А. В. Пономарев, М. А. Матвеев, Ю. А. Морозов</i>	51
ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА СЛАЙДЕР-МОДЕЛИ РАЗЛОМА: ВЛИЯНИЕ УВЛАЖНЕНИЯ ЗОНЫ РАЗЛОМА НА ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ <i>П. А. Казначеев, З.-Ю. Я. Майбук, А. В. Пономарев, Г. А. Соболев, А. В. Патонин, В. В. Кох, Д. В. Краюшкин, Н. А. Закржевская, И. Н. Мигунов</i>	52
ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ: МЕТОДИКА, АППАРАТНОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ <i>П. А. Казначеев, А. В. Пономарев</i>	53
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОТИВОТОЧНОЙ КАПИЛЛЯРНОЙ ПРОПИТКИ НА ОСНОВЕ СЕТЕВОЙ (NETWORK) МОДЕЛИ <i>Кафи Ул Шаббир, О. Я. Извеков, А. В. Конюхов</i>	54
МЕДЛЕННЫЕ ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ, КАК ТРИГГЕР СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, ПО ДАННЫМ ГНСС НАБЛЮДЕНИЙ <i>В. И. Кафтан</i>	55
ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ПОДХОД К МОНИТОРИНГУ НАВЕДЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ ОТ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ СОБЫТИЙ <i>И. О. Китов, И. А. Санина</i>	56
СВЕРХСДВИГОВЫЙ РЕЖИМ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАЗРЫВА <i>С. Б. Кишкина, А. М. Будков</i>	57
ВРЕМЕННЫЕ ЗАДЕРЖКИ РЕАКЦИИ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ НА СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ РАЗЛИЧНОГО КЛАССА <i>Е. Н. Козакова, И. А. Ряховский, С. З. Беккер, Ю. В. Поклад</i>	58
КОЛЬЦЕВАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ НА ГЛУБИНАХ ДО 110 КМ ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ И СИЛЬНЕЙШИМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ В ТИХООКЕАНСКИХ ЗОНАХ СУБДУКЦИИ: ПРОГНОЗ МЕСТА И МАГНИТУДЫ ВОЗМОЖНОГО СОБЫТИЯ В РАЙОНЕ КАМЧАТКИ <i>Ю. Ф. Копничев, И. Н. Соколова</i>	59
ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОСВЯЗИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ <i>В. М. Костин, О. Я. Овчаренко, Е. П. Трушкина</i>	60
О ПЕРЕХОДЕ СЫПУЧЕЙ СРЕДЫ В ПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МНОГОКРАТНЫХ СЛАБЫХ УДАРОВ <i>В. П. Косых, О. А. Микенина</i>	61
ИЗЛУЧЕНИЕ КНЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ИОНОСФЕРНЫМ КОЛЬЦЕВЫМ ИСТОЧНИКОМ <i>Д. С. Котик, О. Ю. Журавлева, Е. В. Орлова, В. А. Яшинов</i>	62

О РОЛИ ФЛЮИДОВ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ СЕЙСМИЧЕСКОГО ЦИКЛА <i>Г. Г. Кочарян</i>	63–64
ИЗМЕРИТЕЛЬ УСКОРЕНИЙ ДЛЯ ЛАБОРАТОРНОЙ МОДЕЛИ РАЗЛОМА <i>Д. В. Краюшкин, П. А. Казначеев, З.-Ю. Я. Майбук, А. В. Пономарев</i>	65
АНОМАЛЬНЫЕ ПОДНЯТИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, ИНДУЦИРОВАННЫЕ РАЗРАБОТКОЙ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА <i>Д. К. Кузьмин</i>	66
ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ОПАСНОСТЬ ИНДУЦИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ <i>Ю. О. Кузьмин</i>	67
АНОМАЛЬНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ КРАТЕРА ЖАМАНШИН: АНАЛИЗ С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ <i>М. Ю. Кузьмичева, Б. А. Иванов</i>	68
О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ И НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСШИРЕННОГО КОМПЛЕКСА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКВАЖИН <i>Д. Ю. Куприн, Н. Д. Архипов, Н. В. Дубиня</i>	69
УТОЧНЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ПОРОД КОЛЛЕКТОРОВ УГЛЕВОДОРОДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ УПРУГИХ СВОЙСТВ <i>Д. Ю. Куприн, И. О. Баяк</i>	70
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗМОЖНОЙ ПОГРЕШНОСТИ МЕЖДУ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ N-КОМПОНЕНТЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО ДАТЧИКА И НАПРАВЛЕНИЕМ НА ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ СЕВЕР <i>А. С. Кухмазов</i>	71
СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ КАК ОСНОВА МОДЕЛИ ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЕ <i>Е. А. Левина, В. В. Ружич</i>	72
СИСТЕМЫ АРЕАЛЬНОГО РИФТИНГА КАК ОТРАЖЕНИЕ 3D СДВИГОВОГО ТЕЧЕНИЯ ГОРНЫХ МАСС <i>М. Г. Леонов</i>	73
ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В F-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ ПО МАТЕРИАЛАМ СТАНЦИЙ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ТОКИО, ВАККАНАЙ, ЯМАГАВА, ТАШКЕНТ <i>Е. В. Липеровская</i>	74
ТРУДНОСТИ ОБОСНОВАНИЯ АНТРОПОГЕННОЙ КОНЦЕПЦИИ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ И АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ МЕХАНИЗМ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ <i>Л. И. Лобковский, И. П. Семилетов, А. А. Баранов, И. С. Владимирова</i>	75
ОПТИЧЕСКИЕ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ «СЕВЕРНАЯ ЗВЕЗДА I» И «СЕВЕРНАЯ ЗВЕЗДА II» <i>Т. В. Лосева, Е. М. Урвачев, Е. С. Гончаров, А. Н. Ляхов, Ю. И. Зецер</i>	76
ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭКСТРЕМУМОВ МГНОВЕННЫХ АМПЛИТУД И ЧАСТОТ ТРЕМОРА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ <i>А. А. Любушин, Е. А. Родионов</i>	77
ПРОЦЕССЫ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЖЕСТКОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ <i>А. Н. Ляхов, Т. В. Лосева, Е. М. Урвачев, Е. С. Гончаров, С. З. Беккер</i>	78
ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОБРАЗОВАНИЯ БУГРОВ ПУЧЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ЗОНЕ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ ВСЛЕДСТВИЕ РАЗЛОЖЕНИЯ ГАЗОГИДРАТОВ <i>О. Н. Малинникова, В. Н. Одинцев, В. А. Бобин</i>	79–80

ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ ИОНОСФЕРЫ NEQUICK НА ДАННЫХ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ <i>Б. А. Матюшин, В. И. Захаров, Н. А. Сухарева</i>	81
ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ СПУТНИКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ К ИЗУЧЕНИЮ КОСЕЙСМИЧЕСКИХ И ПОСТСЕЙСМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ <i>В. О. Михайлов, В. Б. Смирнов, А. М. Конвисар, Е. П. Тимошкина, С. А. Хайретдинов</i>	82
СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПРОЦЕССОВ В ЗОНЕ ЛЕДНИКОВ ВЫСОТНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ <i>Н. Н. Михайлова, А. С. Мукамбаев</i>	83
ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССА СКОЛЬЖЕНИЯ ПО ГЕТЕРОГЕННОМУ МОДЕЛЬНОМУ РАЗЛОМУ <i>К. Г. Морозова, А. А. Остапчук, Д. В. Павлов</i>	84
СВЯЗЬ ОБЛАСТИ ПОВТОРНЫХ ТОЛЧКОВ С РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ПЕРВЫХ АФТЕРШОКОВ В УСЛОВИЯХ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ ХИБИНСКОГО МАССИВА <i>А. Ю. Моторин, С. В. Баранов</i>	85
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФИЛЬТРАЦИИ И СОЗДАНИЯ СЕТИ ТРЕХМЕРНЫХ ТРЕЩИН В ГОРНЫХ ПОРОДАХ СО СЛОЖНЫМ МИНЕРАЛЬНЫМ СОСТАВОМ НА МАСШТАБАХ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА <i>В. А. Начев, С. Б. Турунтаев</i>	86
МЕТОД ОЦЕНКИ ОТДАЛЁННЫХ НЕГАТИВНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ И ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ <i>М. Ю. Николаев, С. Б. Турунтаев, Н. А. Барышников</i>	87
ВОЗМОЖНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ СИЛЬНЫМИ ВАРИАЦИЯМИ ПАРАМЕТРОВ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ <i>В. А. Новиков, В. М. Сорокин</i>	88
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОБЛАКА МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ ЗАКАЧКИ ЖИДКОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАЗЫ ДАННЫХ ЦИФРОВЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ <i>Е. В. Новикова, Н. А. Барышников, М. А. Тримонова</i>	89
СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ РЕКОНСТРУКЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В КОНЦЕПЦИИ КРИТИЧЕСКИ НАПРЯЖЕННЫХ ТРЕЩИН <i>Е. В. Новикова, Н. В. Дубиня</i>	90
КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОГЕННОЙ НАРУШЕННОСТИ МАССИВА ПОРОД И ПРОНИКНОВЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ <i>В. Н. Одинцев, Н. А. Милетенко, Е. В. Федоров, Ф. С. Белоусов</i>	91–92
СЕЙСМОГЕННАЯ СТРУКТУРА ЗОН ФОРМИРОВАНИЯ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ <i>А. А. Остапчук</i>	93
АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ ТЕЛ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ <i>А. А. Остапчук, И. И. Зайруллин</i>	94
АНОМАЛЬНО ВЫСОКИЕ ПИКОВЫЕ УСКОРЕНИЯ КАК СЛЕДСТВИЕ ЭФФЕКТОВ НАПРАВЛЕННОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ОЧАГОВ КРУПНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ <i>О. В. Павленко</i>	95
ЭФФЕКТ АЗИМУТАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ОТКЛИКА ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ В ПРИРАЗЛОМНОЙ ЗОНЕ НА ПРОХОЖДЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ОТ УДАЛЕННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ <i>И. А. Пантелеев, В. Ляховский, Э. Шалев</i>	96
О МЕТОДАХ ЛОКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ЛАБОРАТОРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ <i>А. В. Патонин, Н. М. Шихова, В. Б. Смирнов, А. В. Пономарев</i>	97

АНОМАЛИИ ПАРАМЕТРОВ RTL И B-VALUE ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ КАЛИФОРНИИ <i>А. А. Петрушов, В. Б. Смирнов</i>	98
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ УНЧ ОТКЛИК ОКОЛОЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА НА ГРОЗЫ И ПРОМЫШЛЕННУЮ АКТИВНОСТЬ <i>В. А. Пилипенко, Д. Д. Позднякова</i>	99
ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ПОРОД ДОМОДЕДОВСКОГО КАРЬЕРА <i>М. В. Пирогов</i>	100
РАСШИРЕННЫЙ КАТАЛОГ НЕДАВНИХ МЕСТ ПАДЕНИЯ МЕТЕОРОИДОВ НА МАРСЕ <i>Е. Д. Подобная, О. П. Попова, Б. А. Иванов, Д. О. Глазачев</i>	101
РАЗЛЕТ ФРАГМЕНТОВ МЕТЕОРОИДА ПРИ РАЗРУШЕНИИ <i>О. П. Попова, Е. Д. Подобная</i>	102
О РЕЖИМЕ ВЫЗВАННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ <i>М. В. Родкин</i>	103–104
АНАЛИЗ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ, НОВЫЕ СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ <i>М. В. Родкин, А. А. Кислицын, М. Ю. Кислицына</i>	105
ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ РЕГИСТРАЦИИ КС GRACE НАД ОБЛАСТЯМИ СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ЗОНАХ СУБДУКЦИИ <i>Т. В. Рублева, К. В. Симонов, А. А. Кабанов, А. С. Кругляков</i>	106
БАЙКАЛЬСКИЙ РИФТ – ФОРМИРУЮЩИЙСЯ МЕГАРАЗЛОМ В ЕВРАЗИЙСКОЙ ПЛИТЕ <i>В. В. Ружич, Е. А. Левина</i>	107
КОМПЛЕКСНЫЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ ПОЛЯМИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ МАССОВЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВОВ НА КАРЬЕРАХ КУРСКОЙ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ <i>Ю. С. Рыбнов, С. П. Соловьев, А. В. Крашенинников, С. Ю. Рыбнов</i>	108
ВЛИЯНИЕ КУЧЕВО-ДОЖДЕВЫХ ОБЛАКОВ НА ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ <i>Ю. С. Рыбнов, А. А. Спивак, А. В. Крашенинников, С. Ю. Рыбнов, С. А. Рябова, С. П. Соловьев, А. В. Тихонова</i>	109
ОТКЛИК F2-СЛОЯ ИОНОСФЕРЫ В ЕВРОПЕЙСКОМ РЕГИОНЕ НА ГЕОМАГНИТНУЮ БУРЮ 23-24 МАРТА 2023 Г. <i>С. А. Рябова</i>	110
СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ МАССОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ РАЗМЕРОМ МЕНЕЕ 2.5 МКМ И ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В АВГУСТЕ 2023 Г. И ИХ СВЯЗЬ ПО ДАННЫМ ЦГМ ИДГ РАН <i>С. А. Рябова, С. П. Соловьев, А. В. Крашенинников, С. Ю. Рыбнов, Ю. С. Рыбнов</i>	111
ОЦЕНКА ВКЛАДА D-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ В ВЕЛИЧИНУ ПЭС ВО ВРЕМЯ СЕРИИ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК В СЕНТЯБРЕ 2017 Г. <i>И. А. Ряховский, С. З. Беккер</i>	112
ОБНАРУЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ОТКЛИКА ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЫ НА СНЧ СИГНАЛ, СГЕНЕРИРОВАННЫЙ НАЗЕМНЫМ ПРОТЯЖЕННЫМ ИСТОЧНИКОМ ЗЕВС И ЛИНИЯМИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ, НА НИЗКООРБИТАЛЬНОМ СПУТНИКЕ CSES <i>Н. В. Савельева, В. А. Пилипенко, Н. Г. Мазур, Е. Н. Федоров, Шуфань Жао</i>	113
МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В ИОНОСФЕРЕ ПЕРЕД КАТАСТРОФИЧЕСКИМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ ТОХОКУ <i>Н. В. Савельева, В. А. Пилипенко</i>	114
МОДЕЛЬ ТЕКТЕНИЧЕСКИ ОСЛАБЛЕННЫХ ЗОН РАЙОНА ОБРУЧЕВСКОЙ СИСТЕМЫ РАЗЛОМОВ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ НА ОСНОВЕ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ЛИНЕАМЕНТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МУЛЬТИМАСШТАБНОГО ПОДХОДА <i>А. Д. Свечеревский, С. А. Устинов, А. А. Остапчук</i>	115

ЛУННО-СОЛНЕЧНЫЕ ПРИЛИВЫ КАК ОДИН ИЗ ВОЗМОЖНЫХ ТРИГГЕРОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ <i>Д. Г. Семаков, Э. Р. Семакова</i>	116
КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ВЫЯВЛЕНИЮ ЭМАНАЦИОННЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ ПРИБАЙКАЛЯ) <i>К. Ж. Семинский, А. А. Бобров</i>	117
ГЕОНЕЙТРИНО, ГИДРИДНАЯ ЗЕМЛЯ И АБИОГЕННАЯ НЕФТЬ <i>В. Н. Сергеев</i>	118
ИНДУЦИРОВАННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ В РАЙОНЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ КУМТОР (ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ТЯНЬ-ШАНЬ) <i>И. Н. Соколова, А. В. Березина, И. П. Габсатарова, Е. В. Першина</i>	119
СИЛЬНЫЕ ПОЖАРЫ КАК ИСТОЧНИК ВОЗМУЩЕНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ СРЕДЫ <i>А. А. Спивак, А. В. Крашенинников, С. Ю. Рыбнов, Ю. С. Рыбнов, С. А. Рябова, С. П. Соловьев, А. В. Тихонова</i>	120
ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМАЦИИ ГОРНЫХ ПОРОД <i>Ю. П. Стефанов</i>	121
ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВБЛИЗИ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 9 АВГУСТА 2023 ГОДА НА САХАЛИНЕ ($M = 3.8$) <i>Н. С. Стовбун, Л. М. Богомолов, А. С. Закупин, И. П. Дудченко, С. А. Гуляков, А. И. Казаков</i>	122
ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ КАМЕННЫХ ЛАВИН И ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ ДРОБЛЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ИХ ФОРМИРОВАНИИ <i>А. Л. Стром</i>	123
ЭВОЛЮЦИЯ ЗОН СТАБИЛЬНОСТИ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ В МОРСКОМ ДНЕ ВСЛЕДСТВИЕ ЯВЛЕНИЯ ВЫПАХИВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ДНА ДВИЖЕНИЕМ АЙСБЕРГОВ В СЕВЕРНЫХ МОРЯХ <i>Е. И. Суетнова</i>	124
ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ПОКМАРКОВ <i>А. А. Таирова, Н. А. Юдочкин, Г. В. Беляков</i>	125
«ВЕЕРНЫЙ» МЕХАНИЗМ, СОЗДАЮЩИЙ НОВУЮ ФИЗИКУ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ СВЕРХЗВУКОВЫХ ТРЕЩИН В НАТУРЕ И В ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ <i>Б. Г. Тарасов</i>	126
ОТКЛИК СЕЙСМИЧНОСТИ НА ИЗМЕНЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ И СОСТОЯНИЯ ЕЕ ИОНОСФЕРЫ, СВЯЗАННЫЕ С СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТЬЮ <i>Н. Т. Тарасов</i>	127
ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ПОЛОС ЛОКАЛИЗОВАННОГО СДВИГА В МОДЕЛЯХ Г ОРИЗОНТАЛЬНОГО СЖАТИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ <i>А. А. Татаурова, Ю. П. Стефанов</i>	128
УСТОЙЧИВОСТЬ СВОДА ВЫРАБОТОЧНОГО ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА <i>В. А. Трофимов, И. Е. Шиповский</i>	129
МЕХАНИКА И ГИДРОДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ, ПРИВОДЯЩИХ К ИНДУЦИРОВАННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ ПРИ ЗАКАЧКЕ ЖИДКОСТИ <i>С. Б. Турунтаев, В. Ю. Рига, Е. В. Зенченко</i>	130
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВНУТРЕННЕГО ЯДРА ЗЕМЛИ <i>О. А. Усольцева, В. М. Овчинников</i>	131
ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ЭТАПОВ ФОРМИРОВАНИЯ И КИНЕМАТИКИ КАРКАСА РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ ТУЮКАНСКОГО РУДНОГО УЗЛА (ИРКУТСКАЯ ОБЛАСТЬ) НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ <i>С. А. Устинов, А. Д. Свечеревский, А. М. Чепчугов, В. А. Петров, Е. В. Яровая</i>	132

РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ИЗМЕРЕНИЙ ДОННЫХ И ПЛАТФОРМЕННЫХ ИНКЛИНОМЕТРОВ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ СЕВЕРНОГО КАСПИЯ <i>Е. А. Фаттахов</i>	133
ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСА ИНФРАЗВУКОВЫХ И СЕЙСМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РЕГИСТРАЦИИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СНЕЖНЫХ ЛАВИН В ХИБИНСКОМ ГОРНОМ МАССИВЕ <i>А. В. Федоров, В. Э. Асминг, И. С. Федоров</i>	134
РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА УДАРООПАСНОГО МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД НИКОЛАЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ <i>Д. И. Цой, В. А. Луговой, М. И. Рассказов, А. А. Терешкин</i>	135
ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОСТРУКТУРЫ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИМОРСКОГО РАЗЛОМА БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ <i>В. Е. Чинкин, А. А. Остапчук</i>	136
ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА С ПРОТЯЖЕННЫМ НАРУШЕНИЕМ МАССИВА В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ <i>Т. К. Чумаков</i>	137
СТРОЕНИЕ ЛИТОСФЕРЫ ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА ПО НОВЫМ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ <i>А. В. Шаповалов, А. Г. Гоев</i>	138
СТАБИЛИЗАЦИЯ РЕЖИМА СКОЛЬЖЕНИЯ ГЛИНОСОДЕРЖАЩИХ ТРЕЩИН ПРИ ОБВОДНЕНИИ <i>И. В. Шатунов</i>	139
ВЕРОЯТНОСТНЫЙ И ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ <i>П. Н. Шебалин</i>	140
ВЫДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ В АТМОСФЕРЕ ПРИ ПАДЕНИИ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ РАЗМЕРОМ 20–200 МЕТРОВ <i>В. В. Шувалов</i>	141
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫХОДА ГАЗА С ПОВЕРХНОСТИ ДНА <i>Н. А. Юдочкин, А. А. Таурова, Г. В. Беляков</i>	142
ВАРИАЦИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ И ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ В УНЧ ДИАПАЗОНЕ В ПЕРИОДЫ СОВПАДЕНИЯ ВО ВРЕМЕНИ БЛИЖНЕЙ ГРОЗЫ И ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ <i>Н. В. Ягова, Я. А. Сахаров, В. Н. Селиванов, В. А. Пилипенко</i>	143

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ЗАПИСЕЙ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПРИ ПОМОЩИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ WAVELET SCATTERING И МЕХАНИЗМА ВНИМАНИЯ

И. А. Абзалилов^{1, *}, Н. А. Барышников¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: abzalilov.ia@phystech.edu

Сейсмический мониторинг позволяет отследить множество процессов, происходящих в районах с естественной и индуцированной сейсмичностью. Системы мониторинга производят сбор и дальнейший анализ данных. Появление и активное развитие методов машинного обучения позволяет применить их к обработке сейсмических данных, чтобы упростить ее и ускорить. Это особенно актуально ввиду все большего объема данных, которые поступают с объектов мониторинга.

Методология обработки и анализа сейсмического сигнала при помощи методов AI, как правило, включает в себя преобразование сигналов в частотно-временное представление с дальнейшим применением нейронной сети. Нейронная сеть может представлять из себя последовательность из сверточных, рекуррентных и полносвязных и других типов слоев. Подобный подход демонстрирует свою эффективность относительно большого числа задач сейсмологии: выделение сигнала относительно шума, выделение первых вступлений S и P волн, локация источника сейсмического события и его характеристик.

В настоящей работе применен подход к анализу сейсмических сигналов, направленный на поточную обработку множества записей. В качестве входных данных для модели использованы Wavelet Scattering представления сигналов от нескольких станций. Основным архитектурным элементом является механизм Attention, который позволяет как обработать сигнал от одной станции, так и произвести учет корреляции сигналов между ними. Это делает возможным решение одновременно задачи выделения первых вступлений сейсмических волн и задачи локализации источников сейсмических событий.

Выборка для обучения и анализа включала в себя как синтетические волновые формы, сгенерированные при помощи пакета Pyroco, так и реальные записи сигналов, полученные станциями на о. Сахалин. В результате работы показано, что использование обоих типов данных для обучения позволяет повысить качество работы итоговой модели.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900167-1).

COMPLEX ANALYSIS OF SEISMIC SIGNAL RECORDINGS USING A NEURAL NETWORK BASED ON WAVELET SCATTERING AND AN ATTENTION MECHANISM

I. A. Abzalilov^{1, *}, N. A. Baryshnikov¹

¹Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Science, Moscow, Russia

*E-mail: abzalilov.ia@phystech.edu

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УЧАСТКОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ НА ТЕРРИТОРИИ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ПЛИТЫ

А. Ж. Ахметов^{1, *}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия

*E-mail: ayan.akhmetov93@gmail.com

Всестороннее изучение геологических процессов, происходящих в литосфере Земли, важно для обогащения фундаментальных научных знаний в области наук о Земле, а также обеспечения требований природной и техногенной безопасности в ходе ведения горных работ. Оно включает, в том числе, анализ геолого-геофизических данных для создания компьютерных физических моделей структур, изучение напряженно-деформированного состояния участков земной коры и верхней мантии.

Поэтому актуальной задачей является разработка физико-математических моделей и методов для расчета НДС земной коры и верхней мантии и его эволюции. В настоящее время многие исследователи используют комбинированные термо-вязко-упруго-пластические модели, которые позволяют описать совместную глобальную эволюцию литосферы Земли, где учитываются геолого-геофизические процессы влияния мантийного слоя на структуры земной коры.

В качестве объекта исследования были выбраны нефтегазоносные области, расположенные на территории Западно-Сибирской плиты.

В ходе выполнения научного исследования были созданы модели структуры геологических объектов Западно-Сибирской плиты на основе глубокого анализа геолого-геофизических данных геологических профилей «Битум – 1989», «Рубин–2 – 1990», была модифицирована модель упругопластической среды Друкера – Прагера – Николаевского с неассоциированным законом течения путем применения прочностной модели «*cratonic jelly sandwich*», позволяющая описать изменения прочностных свойств элементов земной коры с изменением глубины, проведено компьютерное моделирование исследования напряженно-деформированного состояния участка земной коры и проанализированы особенности локализации пластической деформации и распределения параметров напряженного состояния в слоях земной коры в выбранном регионе, и затем сопоставлены результаты компьютерного моделирования с картой разломов земной коры и местоположениями полезных ископаемых на территории Западно-Сибирской плиты.

На основе полученных результатов была проведена попытка сопоставления результатов компьютерного моделирования с экспериментальными геолого-геофизическими данными для предварительной оценки выявления полезных ископаемых в толще земной коры. Полученные результаты могут быть полезны в ходе добычи полезных ископаемых и ведении подземных работ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 23-71-01086).

COMPUTER SIMULATION OF STATE OF THE STRESS AND STRAIN OF SECTIONS OF THE EARTH'S CRUST AND UPPER MANTLE ON THE WEST SIBERIAN PLATE

A. Z. Akhmetov^{1, *}

¹Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

*E-mail: ayan.akhmetov93@gmail.com

МАКЕТ АППАРАТУРЫ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ТОЧНОЙ ПРИВЯЗКОЙ К МИРОВОМУ ВРЕМЕНИ

Н. С. Ачкасов^{1, *}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: nsachkasov@yandex.ru

В рамках договора о творческом научном сотрудничестве между ИДГ РАН и ИЗМИРАН, заключенного в 2020 г., ведется непрерывный мониторинг сигналов средневолновых (СДВ) передатчиков в геофизической обсерватории Ульяновка Калининградского филиала ИЗМИРАН. Кроме того, с 2014 г. в Геофизической обсерватории «Михнево» ИДГ РАН также проводится постоянный мониторинг СДВ передатчиков. Для регистрации в двух пунктах используется импортное, дорогостоящее оборудование, что в сложившейся мировой обстановке накладывает свои сложности при необходимости вести непрерывный мониторинг, а именно:

- отсутствие возможности проведения ежегодных сервисных работ, ремонтно-восстановительных работ у представителя производителя в случае выхода из строя геофизической системы измерения;
- ограничения в возможности расширения сети приемных пунктов без наличия собственного оборудования.

В данной работе представлены ключевые особенности разрабатываемого оборудования, описаны основные принципы, конструкция. Приведен анализ сигналов, полученных из наблюдений в обсерваториях «Михнево» (54.95' С.Ш., 37.7' В.Д.) и «Ульяновка» (54.6' С.Ш., 20.2' В.Д.). Увеличение приемных пунктовкратно улучшит пространственное разрешение при восстановлении параметров ионосферы и позволит обеспечить детальный анализ перемещения ионосферных неоднородностей. Для дальнейшего развертывания сети приемных станций требуется разработка макета собственной аппаратуры, которая позволит создать распределенную систему приёмников крайне-низкочастотного (КНЧ)/очень-низкочастотного (ОНЧ) излучения.

Полученные экспериментальные данные используются для восстановления профилей электронной концентрации в нижней ионосфере в различных гелиогеофизических условиях, в свою очередь электронные профили используются для коррекции и верификации теоретических и вычислительных моделей нижней ионосферы.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900175-6).

MODEL OF EQUIPMENT FOR MONITORING GEOPHYSICAL PROCESSES WITH PRECISE REFERENCE TO WORLD TIME

N. S. Achkasov^{1, *}

¹Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: nsachkasov@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ ГАЗА В ПОРАХ НА ЛИНЕЙНОСТЬ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ СРЕДЫ ТИПА ПОРОД ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА

Н. А. Барышников^{1,*}, П. Е. Зенченко¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: baryshnikov.na@idg.ras.ru

Цель настоящей работы заключалась в том, чтобы при помощи лабораторного моделирования оценить возможное влияние газа в среде типа пород донных отложений Восточно-Сибирского Арктического шельфа на её фильтрационные свойства. Для проведения лабораторных опытов была использована оригинальная методика исследования нелинейных фильтрационных свойств низкопроницаемых горных пород. Данная методика основана на проведении измерений в процессе медленного спада градиента порового давления. Это позволяет исследовать фильтрационные свойства образцов при градиентах давления, сопоставимых с гидростатическим, что крайне важно для рассматриваемой задачи. В качестве модели среды использовались искусственные цилиндрические образцы (длина и диаметр по 3 см), изготовленные из смеси гипса с цементом с фильтрационными свойствами, близкими к натуральным: проницаемостью порядка 10 мД и пористостью порядка 0.5. Решение использовать искусственные образцы было продиктовано, с одной стороны, желанием добиться лучшей повторяемости и воспроизводимости условий эксперимента и, с другой стороны, невозможностью использовать реальные образцы в имеющейся установке ввиду их неконсолидированности. В ходе испытаний в насыщенный модельный образец закачивалось определённое количество газа (воздух), после чего производилось измерение его эффективной проницаемости в зависимости от градиента порового давления. Полученная кривая интерпретировалась в рамках модели порогового градиента. В ходе работы было испытано 3 идентичных искусственных образца и суммарно проведено около 70 опытов, по несколько опытов с каждым значением газонасыщенности. В результате испытаний были получены кривые зависимости величины порогового градиента от газонасыщенности для нескольких образцов. Установлено, что пороговый градиент линейно растёт с увеличением доли газа в поровом пространстве. Уже при доле газа порядка 0.02 эта величина в опытах достигает 0.01 МПа/м, что соответствует гидростатическому градиенту давления в воде. Это может говорить о том, что области среды даже с небольшой газонасыщенностью могут быть непроницаемыми для конвективных потоков флюида. Эту возможность необходимо учитывать при создании моделей транспорта пузырькового газа через толщу пород донных отложений. Кроме того, существование газонасыщенных зон с пороговыми градиентами может существенно повлиять на вид вертикального профиля порового давления и привести к переоценке глубины зоны стабильности газового гидрата.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 22-67-00025).

IMPACT OF PORE GAS ON THE LINEARITY OF FILTRATION PROPERTIES OF ARCTIC SHELF BOTTOM SEDIMENTS

N. A. Baryshnikov^{1,*}, P. E. Zenchenko¹

¹Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: baryshnikov.na@idg.ras.ru

СЛОЙ ПРЕДЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ КАК ГЕОСФЕРА ЗЕМЛИ И СРЕДА ДЛЯ ТРИГГЕРНЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

А. С. Батугин^{1, *}

¹Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

*E-mail: as-bat@mail.ru

Используемые в современной научной литературе представления о том, что разломы земной коры или ее участки находятся в состоянии близком к предельному коррелируют с представлениями профессора И. М. Петухова о предельно напряженном состоянии земной коры в целом, сформулированные им в конце 20-го века. На основе концепции предельно напряженного состояния земной коры в слое от земной поверхности до некоторой глубины рассмотрен вопрос об оценке максимально возможной магнитуды техногенного землетрясения, а также ряд геодинамических эффектов, которые наблюдаются не только при техногенном воздействии на земную поверхность и массив, но и в естественных условиях. Исходя из теории неустойчивости, используемой в исследованиях по горным ударам, предполагается, что достижение в земной коре предельно напряженного состояния является необходимым, но недостаточным условием для возникновения сейсмических явлений. Предельно напряженное состояние части земной коры рассматривается как способ ее существования, а сам слой предельно напряженного состояния, несмотря на его дискретность, как одна из геосфер Земли. Частично материалы опубликованы в работах А. С. Батугина [1, 2]

Литература:

1. Батугин А.С. Геодинамические эффекты предельно напряженного состояния земной коры // Горная промышленность. 2023. № S1. С. 14–21. <https://doi.org/0.30686/1609-9192-2023-S1-14-21>
2. Batugin A. A proposed classification of the Earth's crustal areas by the level of geodynamic threat // Geodesy and Geodynamics. 2021. Vol. 12 (1). P. 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2020.10.002>

THE LAYER OF THE EXTREMELY STRESSED STATE OF THE EARTH'S CRUST AS THE GEOSPHERE OF THE EARTH AND THE ENVIRONMENT FOR TRIGGER GEODYNAMIC EFFECTS

A. S. Batugin^{1, *}

¹The National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia

*E-mail: as-bat@mail.ru

РОСТ ГЕОМАГНИТНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ В ЛЭП НА КОЛЬСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ И В КАРЕЛИИ ВО ВРЕМЯ СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ БУРЬ

В. Б. Белаховский^{1, *}, В. А. Пилипенко², Я. А. Сахаров¹, В. Н. Селиванов³

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт», Апатиты, Россия

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

³Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия

*E-mail: belakhov@mail.ru

В данной работе проанализированы случаи с экстремальными значениями геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ) в линиях электропередач (ЛЭП) на Кольском полуострове и в Карелии с 2012 года. Система регистрации ГИТ создана Полярным геофизическим институтом и Центром физико-технических проблем энергетики Севера ФИЦ КНЦ РАН и включает в себя 5 станций, ориентированных в основном в направлении север-юг. При анализе событий рассматривались данные ГИТ с авроральной станции Выходной (VKH) и субавроральной станции Кондопога (KND). Данные ГИТ сопоставлялись с данными магнитометров ПГИ в обсерваториях «Ловозеро», «Лопарская», с данными магнитометров сети IMAGE. Экстремальные значения ГИТ и dB/dt сопоставлялись с параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, индексами геомагнитной активности.

Представлен анализ ГИТ во время сильных магнитных бурь: 28–29 июня 2023 г., 17–20 марта 2015 г., 7–8 сентября 2017 г., 27–29 мая 2017 г., 23–24 апреля 2023 г. и др.

Наибольшие скачки ГИТ происходят во время суббурь (отрицательные магнитные бухты, связанные с развитием западного электроджета). При этом развитие вихревых токовых систем во время суббури (P13 геомагнитных пульсаций) может давать заметный вклад в рост ГИТ для ЛЭП, ориентированной в направлении север-юг.

Не наблюдается однозначной связи высоких значений величины ГИТ с параметрами межпланетной среды (скорость, плотность, $V \cdot Bs$), индексами геомагнитной активности (SYM-H, AE). При этом высокие значения ГИТ могут наблюдаться как во время CME, так и во время CIR магнитных бурь. Появление экстремальных ГИТ связано с тонкой структурой ионосферных токовых систем. Поэтому предсказание высоких значений ГИТ далеко не всегда сводится к прогнозу сильной магнитной бури.

THE GROWTH OF GEOMAGNETICALLY INDUCED CURRENTS IN POWER LINES ON THE KOLA PENINSULA AND KARELIA DURING STRONG MAGNETIC STORMS

V. B. Belakhovsky^{1, *}, V. A. Pilipenko², Y. A. Sakharov¹, V. N. Selivanov³

¹Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia

²Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³Center for Physical and Technical Problems of Northern Energy, Kola Science Center RAS, Apatity, Russia

*E-mail: belakhov@mail.ru

ОНЛАЙН СИСТЕМА TESLASWARM ДЛЯ АНАЛИЗА ТОКОВ В ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ SWARM И НАЗЕМНЫХ СТАНЦИЙ

И. О. Белов^{1, *}, В. А. Пилипенко^{1, 2}, Д. В. Кудин¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук, Москва, Россия

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

*E-mail: i.belov@gcras.ru

Продольные электрические токи вдоль силовых линий геомагнитного поля обеспечивают электродинамическую связь между околоземным пространством и проводящим слоем земной ионосферы. В то время, как крупномасштабная структура токов и ее управляющие параметры достаточно хорошо выяснены, мелкомасштабная структура токов и механизмы ее формирования остаются недостаточно понятными. Возмущения геомагнитного поля у земной поверхности, создаваемые быстропеременными продольными токами, оказываются ответственными за возбуждение всплесков геоиндуцированных токов в технологических системах. Эффективным методом регистрации продольных токов являются измерения их магнитного эффекта на низкоорбитальных спутниках. В ходе доклада будет представлена разработанная онлайн-система TeslaSwarm (<http://aleph.gcras.ru/teslaswarm/>) для анализа продольных токов по данным спутников SWARM, которая дает исследователям удобный инструмент для изучения явлений космической погоды. С помощью TeslaSwarm были рассмотрены несколько реальных геомагнитных событий с импульсными возмущениями по данным синхронных наблюдений на спутниках SWARM и наземной сети магнитных станций SuperMAG: (1) изолированные магнитные импульсы (magnetic impulsive events) длительностью 10–15 мин большой амплитуды (более сотни нТл), наблюдающиеся на фоне суббури; (2) транзиентные пульсации типа $Pi2$, которые являются наземным маркером взрывного начала суббури. Выбирались события, во время которых эти импульсные возмущения были одновременно зарегистрированы на спутниках SWARM и сетях наземных станций. Сопоставление информации о продольных токах в верхней ионосфере и наземном магнитном отклике позволило сделать вывод о физической природе рассмотренных импульсных возмущений и механизме их переноса из ночной магнитосферы к земной поверхности.

THE TESLASWARM ONLINE SYSTEM FOR ANALYZING CURRENTS IN THE UPPER IONOSPHERE ACCORDING TO SWARM SATELLITE DATA AND GROUND STATIONS

I. O. Belov^{1, *}, V. A. Pilipenko^{1, 2}, D. V. Kudin¹

¹Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: i.belov@gcras.ru

МОНИТОРИНГ СЛАБОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ НА ЖЕЛЕЗОРУДНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ КУРСКОЙ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ

А. Н. Беседина^{1, *}, Г. Г. Кочарян¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: besedina.a@gmail.com

На протяжении более 5 лет на Коробковском железорудном месторождении Курской магнитной аномалии (г. Губкин, Белгородская область, Россия) проводится мониторинг слабой сейсмичности, связанной с подземной разработкой массива горных пород (шахта им. Губкина). Сейсмический мониторинг осуществляется в периоды остановки работы горнодобывающего оборудования в дни проведения массовых взрывов. В течение всего периода наблюдений схема регистрации изменялась от 1–2 точек наблюдения (которые позволяли проводить только обнаружение событий) до 4 измерительных пунктов, включая точку в трехкомпонентном исполнении (которые позволяли проводить локацию сейсмических событий с точностью до 50 м). В работе представлен анализ очаговых параметров сейсмических событий, индуцированных взрывами в камерах на разном удалении от Северо-Западного разлома. Полученные значения магнитуд от -2.5 до -1.4 соответствуют радиусам очага от первых метров до первых десятков метров. Значение рассчитанной сейсмической энергии варьируется от 0.0006 до 1 Дж. При этом более высокие значения энергии получены для сейсмических событий, зарегистрированных после взрыва в камере на удалении от зоны разлома, при сопоставимых значениях скалярного сейсмического момента. Приведенная сейсмическая энергия (отношение скалярного сейсмического момента к излученной сейсмической энергии) демонстрирует наличие зависимости от масштаба события. Рассчитанные скорости распространения разрыва для индуцированных событий на шахте им. Губкина намного ниже характерных значений при динамических подвижках. Полученные закономерности подтверждают предположение о влиянии структурного и вещественного состава вмещающего массива и заполнителя трещин на масштабные соотношения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 22-17-00204).

MONITORING OF WEAK SEISMICITY AT THE IRON ORE DEPOSIT OF THE KURSK MAGNETIC ANOMALY

A. N. Besedina^{1, *}, G. G. Kocharyan¹

¹Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: besedina.a@gmail.com

ИНСТАНТОННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ФОРШОК – АФТЕРШОКОВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ НА ПРИМЕРЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ САХАЛИНА

Л. М. Богомолов^{1, *}, М. В. Родкин^{1, 2, 3}, В. Н. Сычев¹

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

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

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: bleom@mail.ru

Инстантоны – локализованные во времени возмущения физических полей. Инстантоны используются в ряде разделов теоретической физики как упрощенная модель переходных процессов (или переходов между состояниями системы в квантовой механике). Название «инстантоны» подчеркивает их аналогию с солитонами, т.е. пространственно-локализованными волновыми возмущениями, которая проявляется при замене в уравнениях для волновой формы текущей координаты x на время t . Наглядный образ инстантонного решения – производная по времени от логистической (S - образной) зависимости, описывающей переходный процесс. Скорость такого процесса сначала значительно возрастает, достигает максимума, а затем асимптотически убывает до нуля. Траектория деформационных процессов в области вокруг готовящегося очага землетрясения как перехода между состояниями «до» и «после» главного события довольно тривиальна при рассмотрении на качественном уровне. Но количественное описание форшоков и афтершоков проводится, как правило, отдельно. Использование кинетических уравнений, имеющих инстантонные решения, для моделирования потока сейсмических событий перед и после главного удара позволяет унифицировать описание форшоковых и афтершоковых последовательностей. Сходство этих последовательностей видно уже из подобия математических выражений для прямого и обратного законов Омори – Утсу. Еще более тесную аналогию между ними показали исследования обобщенной окрестности сильного землетрясения (ООСЗ). Было убедительно показано, что сходство распространяется также на аномалии изменения наклона графика повторяемости (средней магнитуды землетрясения) и на ряд других характеристик процесса активизации. При этом все выявляемые в ООСЗ аномалии допускают вполне определенную количественную параметризацию. Естественно, в разных случаях значения параметров соответствующих регрессионных соотношений и такие характеристики, как некое среднее отношение числа фор- и афтершоков, варьируют. Полученные в ООСЗ эмпирические закономерности мы используем для подбора параметров инстантонной модели.

Цель доклада – продемонстрировать плодотворность использования инстантонной модели на примере землетрясений в южной части о-ва Сахалин за 2003–2022 гг. Эмпирические зависимости сейсмической активности от времени строились для территории в пределах ($44.5^\circ - 50.5^\circ$ С.Ш., $141.5^\circ - 143.5^\circ$ В.Д.). При сопоставлении эмпирических графиков и решений кинетических уравнений были подобраны параметры модельных уравнений для инстантонов. Показано, что удовлетворительное сходство временных зависимостей в интервале плюс минус 20 суток от главного события обеспечивают сравнительно простые кинетические уравнения первого порядка. Более сложные уравнения второго порядка позволяют описать закономерность, что количество афтершоков и период их активности больше, чем для форшоков. Инстантонное описание обобщает естественным образом модель саморазвивающихся процессов (СРП), в рамках которой выделяется стадия взрывного роста числа форшоков перед главным событием, что может быть прогнозным признаком. Реализация СРП есть не что иное как известный в синергетике случай режимов с обострением. И она сталкивается с принципиальной трудностью – описываемый этой моделью неограниченный рост активности, т.е. сингулярность решения, перед или в момент главного события не отвечает реальным наблюдениям, да и вообще является чисто математической абстракцией. Инстантонная модель устраняет это противоречие, так как из нее получаются решения с пиком активности, но без сингулярности. Максимальная активность может

превышать начальную на один–два порядка, причем пик достигается при накоплении определенного числа событий. Это число зависит от начальных условий и может рассматриваться как прогнозный параметр. Сценарий с инстантонами находится в соответствии с представлениями о концентрационном критерии разрушения сплошности среды.

**INSTANTON REPRESENTATION OF FORESHOCK – AFTERSHOCK SEQUENCES,
SAKHALIN ISLAND EARTHQUAKES' CASE STUDY**

L. M. Bogomolov^{1,*}, M. V. Rodkin^{1,2,3}, V. N. Sychev¹

¹*Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Yuzhno – Sakhalinsk, Russia*

²*Schmidt Institute of Earth Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³*Institute of Earth quakes Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**E-mail: bleom@mail.ru*

НЕЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ВЗАИМОСВЯЗИ МАГНИТУДЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЛНИЙ В ТИХООКЕАНСКОМ РЕГИОНЕ

А. М. Бондаренко^{1,2,*}, Н. В. Ягова¹, Е. О. Макаров³

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

²Национальный исследовательский институт «Московский Энергетический Институт», Москва, Россия

³Камчатский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Москва, Россия

*E-mail: alex_bondarenko2003@mail.ru

В работах, посвященных исследованиям сейсмоэлектромагнитных явлений, было обнаружено изменение поляризации электромагнитных излучений УНЧ-КНЧ диапазона накануне землетрясений с $M > 5$ в Тихоокеанском регионе, в том числе на Камчатке и в Японии [1]. Возможным механизмом этого эффекта является пространственное перераспределение молниевых разрядов вблизи активного разлома, что подтверждается существенным вкладом региональной грозовой активности в наблюдаемую мощность УНЧ шумов и наблюдавшимися для отдельных землетрясений случаями перераспределения [2].

Настоящая работа посвящена статистической проверке этого эффекта. Для анализа используются данные сейсмического каталога Американской геофизической службы (USGS) и пространственного распределения молний по данным сети WWLLN в районе Курило-Камчатской дуги с 2010 по 2016 гг. Методами машинного обучения построена модель статистической зависимости между параметрами пространственного распределения молний и магнитудой землетрясений. Была построена аппроксимация пространственного расположения землетрясений, которая является моделью разлома на исследуемом участке. Данные о пространственном расположении были переведены в базис большого круга на земной поверхности, дающего лучшую линейную аппроксимацию разлома. Полученная модель включает основную линию и главные ветви в перпендикулярном направлении. Были выделены суточные кластеры молний и составлены характеристики, описывающие положение кластеров и пространственное распределение молний в них, включая расстояния до основной линии и ветвей разлома и моменты распределения молний внутри кластера.

Оценка линейной связи полученных характеристик и магнитуды землетрясений показала близкую к 0 корреляцию и для моделирования статистической взаимосвязи была разработана нелинейная модель. После модификации исходного базиса в полученном признаковом пространстве был реализован метод главных компонент, позволивший выделить наиболее значимые параметры взаимосвязи. Модель была построена методом градиентного бустинга над решающими деревьями, представляющую последовательность функций, минимизирующую среднеквадратичное отклонение путём градиентного спуска. Модель отобрана методом селекции кросс-валидацией. Для этого данные были разбиты на выборки разными способами, а модель выбиралась таким образом, чтобы минимизировать среднеквадратичное отклонение одновременно на всех выборках.

В результате получена статистически устойчивая модель взаимосвязи магнитуды землетрясения и пространственного распределения молний в день землетрясения и предшествующие два дня. Распределение молний описывается вектором размерности 6 для оптимального описания и 4 – для наиболее экономного. Зависимость магнитуды от входных параметров нелинейная и немонотонная – в признаковом пространстве имеются области повышенного риска сильных землетрясений. После верификации на данных многолетних наблюдений модель может быть полезным инструментом анализа и сейсмоэлектромагнитных процессов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 22-17-00125).

Литература

1. Schekotov A.Y., Molchanov O. A., Hayakawa M. et al. ULF/ELF magnetic field variations from atmosphere induced by seismicity // Radio Sci. 2007. V. 42. RS6S90. <https://doi.org/10.1029/2005RS003441>
2. Yagova N.V., Sinha A.K., Pilipenko V.A. et al. ULF electromagnetic noise from regional lightning activity: Model and observations // Journ. Atm. Solar-Terr. Phys. 2019. V. 182. P. 223–228. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.12.005>

NONLINEAR MODEL OF THE STATISTICAL RELATION BETWEEN EARTHQUAKE MAGNITUDE AND SPATIAL DISTRIBUTION OF LIGHTNING IN THE PACIFIC REGION

A. M. Bondarenko^{1,*}, N. V. Yagova², E. O. Makarov³

¹*Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*National research university «Moscow power engineering institute», Moscow, Russia*

³*Kamchatka branch of the Federal state budgetary institution of science of the Federal research center «Unified geophysical service of the Russian academy of sciences», Moscow, Russia*

**E-mail: alex_bondarenko2003@mail.ru*

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗОНЫ ВЛИЯНИЯ СЕЙСМОГЕННОГО РАЗЛОМА В РЕЗУЛЬТАТЕ ДИНАМИЧЕСКОГО СДВИГА

А. М. Будков^{1, *}, Г. Г. Кочарян¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: jack77@mail.ru

В классических моделях, рассматривающих процесс динамического распространения разрыва в очаге землетрясения, не описывается процесс формирования зон повреждения по латерали – в направлении, перпендикулярном к плоскости трещины. При этом, из геолого-геофизических данных известно о наличии в окрестности разлома довольно обширной зоны поврежденного материала – зоны динамического влияния, где материал обладает повышенной трещиноватостью и проницаемостью, сниженными значениями скоростей распространения упругих волн. Эти параметры достигают фоновых значений на некотором удалении от зоны сместителя. Как механические характеристики зоны влияния, так и ее структура не всегда адекватно воспроизводятся в различных моделях. Зачастую разломной зоне на сейсмогенных глубинах приписываются свойства и размеры, наблюдаемые обычно в зонах динамических разрывов, вышедших на дневную поверхность. Согласно ряду распространенных моделей развития разрыва, проницаемость зоны увеличивается на много порядков за счет образования зияющих трещин.

В настоящей работе выполнено численное моделирование процесса развития зоны нарушенного материала при динамическом распространении разрыва вдоль существующего разлома. Для оценки размеров и механических характеристик зоны сдвигового разрушения примыкающего к разлому материала, динамически нарушенного в результате подвижки вдоль поверхности скольжения, используется величина второго инварианта девиатора тензора деформаций (интенсивности сдвига). Чтобы поставить в соответствие расчетной величине ту или иную степень нарушенности массива, были использованы данные измерений при крупномасштабных взрывах.

Отдельно рассмотрен процесс разрушения породы отрывом на разных глубинах залегания зоны скольжения. Показано, что общая картина разрушения скальной породы сильно зависит от глубины расположения зоны скольжения. Для использованных в расчете параметров на глубине более ~ 9 км литостатические напряжения полностью блокируют разрушение отрывом. На глубине менее ~ 6 км, напротив, отрыв является основным механизмом разрушения породы.

Результаты расчетов в совокупности с анализом данных полевых наблюдений, лабораторных и натурных экспериментов позволяют очертить разумные границы характерных размеров и эффективных механических свойств зон динамического влияния сейсмогенных разломов в низкопористом кристаллическом массиве. Судя по полученным результатам, образование зоны влияния разлома происходит, главным образом, на квазистатической стадии формирования единой магистральной зоны разлома при объединении отдельных макроразрывов. В дальнейшем, на сейсмогенных разломах большая часть кумулятивного перемещения накапливается в ходе многократно повторяющихся косейсмических подвижек. При этом распространение динамического разрыва приводит к довольно слабым изменениям свойств вмещающего массива. Изменения свойств массива происходят за счет раскрытия ранее существовавших трещин.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 22-17-00204).

CHANGES IN THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE FAULT DAMAGE ZONE AFTER DYNAMIC SLIP

A. M. Budkov^{1, *}, G. G. Kocharyan¹

¹Sadovsky institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: jack77@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МЕЛКИХ МЕТЕОРНЫХ ТЕЛ: ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОТЫ АБЛЯЦИИ

А. И. Бушманова^{1,*}, В. В. Ефремов¹, О. П. Попова¹, Д. О. Глазачев¹, А. П. Карташова²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: bushmanova.ai@phystech.edu

Метеорные тела предоставляют важные сведения о нашей Солнечной системе. К сожалению, большая часть этих объектов не достигает поверхности Земли, поэтому основным методом изучения метеорных тел является исследование их взаимодействия с атмосферой. Проблема точного определения массы, плотности и свойств вещества метеороидов остается актуальной уже долгое время. В данной работе исследуются метеоры потока Персеид. Для оценки параметров метеорных тел (массы, плотности и т.д.) по наблюдательным данным используется модель абляции, в которой набегающий тепловой поток расходуется только на испарение метеороида. Метеорное тело рассматривается как сплошное сферическое тело. Для оценки параметров метеороидов используется автоматизированный метод поиска решения с помощью минимизации функции невязки. Данная функция является разницей между смоделированной кривой блеска и кривой блеска метеора. Она служит количественной метрикой, отражающей пригодность данного решения. Использовались четыре различные функции невязки. Оценка параметров метеороидов зависит от выбранного коэффициента абляции, в который входит теплота абляции вещества метеороида. Использовались значения теплоты абляции по свойствам вещества метеоритов $Q = 3.2 \times 10^6$ Дж/кг и $Q = 6 \times 10^6$ Дж/кг. Масса метеорных тел, найденная при разных значениях Q , различается до 10%, радиус от 25% до 50%, плотность отличается примерно в 2–3 раза. Для рассматриваемых метеороидов ранее были получены оценки параметров в рамках другой модели абляции. Различие между используемой в данной работе моделью абляции и другой моделью состоит в записи уравнения энергии и потери массы. В другой модели поступающий тепловой поток расходуется на излучение, нагревание и испарение метеороида, а потеря массы определяется с помощью уравнения Клапейрона, в которое входит давление насыщенного пара используемого вещества. Сравнение полученных нами оценок параметров метеороидов и оценок, полученных в рамках другой модели, показало, что оценки массы и радиуса отличаются менее чем в 2 раза, плотность – до 9 раз. Метеорный поток Персеид является сильным потоком, он впервые был открыт в 1834 г. и постоянно наблюдается и изучается. Мы сравнили полученные оценки плотности с плотностями полученными другими авторами [1, 2, 3, 4]. Диапазоны плотностей не совпали.

Литература

1. Babadzhanov P., Kokhirova G. Densities and porosities of meteoroids // *Astron. Astrophys.* 2009. Vol. 495. P. 353–358. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:200810460>
2. Bellot Rubio L.R., Martínez González M.J., Ruiz Herrera L., Licandro J., Martínez Delgado D., Rodríguez-Gil P., Serra-Ricart M. Modeling the photometric and dynamical behavior of Super-Schmidt meteors in the Earth's atmosphere. *Astron // Astrophys.* 2002. Vol. 389 P. 680–691. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20020672>
3. Kikwaya J.-B., Campbell-Brown M., Brown P. Bulk density of small meteoroids // *Astron. Astrophys.* 2011. Vol. 530 (113) P. 1–17. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201116431>
4. Efremov V.V., Popova O.P., Glazachev D.O., Margonis A., Oberst J., Kartashova A.P. Ablation of small meteor bodies: comparison of solid and porous body models // *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics.* 2023. Vol. 81. P. 110–122. <https://doi.org/10.17223/19988621/81/10>

DETERMINATION OF PARAMETERS OF SMALL METEORIC BODIES: INFLUENCE OF ABLATION HEAT

A. I. Bushmanova¹, V. V. Efremov¹, O. P. Popova¹, D. O. Glazachev¹, A. P. Kartashova²

¹Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: bushmanova.ai@phystech.edu

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕРЫ СНИЖЕНИЯ ОПАСНОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ГОРНЫХ УДАРОВ НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ КИТАЯ

Ван Цжизян^{1, *}

¹Китайский университет горного дела и технологий, Пекин, Китай

*E-mail: confidgras@gmail.com

Горные удары относятся к группе динамических явлений, возникающих при ведении горных работ. Характер протекания этого динамического явления отражен в многочисленных определениях, общим в которых является то, что это внезапное разрушение участка угольного пласта или породы, происходящее в форме взрыва, сопровождаемого громким звуком, воздушной волной, разлетом обломков, смещением горных машин и механизмов. Опасность проявления горных ударов является сдерживающим фактором повышения интенсивности добычи. Также это является значимым социальным фактором в горнопромышленных районах. Угольные целики, оставляемые в шахте в связи с особенностями технологии добычи, становятся концентраторами механических напряжений и источниками опасности проявления горных ударов. Триггером горного удара может быть быстрое изменение напряженного состояния под воздействием не только локальных, но и трудноуправляемых региональных факторов. Поэтому для снижения опасности проявления горных ударов в Китае внедряются безцеликовые технологии добычи, позволяющие избавиться от опасных концентраторов напряжений. Некоторым особенностям этих технологий посвящена часть настоящего доклада. Например, расположение шахтных штреков вприсечку к отработанному пространству позволяет вывести их из зоны высокого опорного давления и сократить размер целиков или отказаться от них. Также, изменение длины забоя при разработке целика может не только повысить скорость добычи угля, но и снять высокое горное давление, создаваемое целиком, тем самым уменьшая деформации пород вокруг нижерасположенного штрека. Чем длиннее забой, тем эффект снижения горного давления проявляется сильнее. Таким образом, технологические операции позволяют снизить влияние триггерного эффекта возникновения горных ударов в угольных шахтах.

TECHNOLOGICAL MEASURES TO REDUCE THE RISK OF MINING IMPACTS IN CHINA'S COAL MINES

Wang Zhiqiang^{1, *}

¹Chinese University of Mining and Technology, Beijing, China

*E-mail: confidgras@gmail.com

К УПРАВЛЕНИЮ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВЗРЫВНОЙ ОТБОЙКЕ

С. Д. Викторов¹, В. М. Закалинский^{1, *}, И. Е. Шиповский¹, Р. Я. Мингазов¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: vmzakal@mail.ru

Практика горных технологий при разработке месторождений полезных ископаемых свидетельствует о тенденции развития ее различных аспектов в процессе решения различных проблем горного производства. В настоящей статье дана прогнозная концепция научно-обоснованного решения, связанная с результатами влияния заданного взрывного воздействия на состояние горного массива в интересах горных технологий. В данном исследовании рассмотрены особенности влияния направленного действия взрыва на естественные элементы состояния массива в рамках объемной и временной масштабности добычи полезных ископаемых. Использован соответствующий инструментарий для реализации цели данного рассмотрения. В частности, для технологического эффекта направленного взрывания показаны результаты взрыва скважинного заряда в форме различных видов пучка сближенных зарядов и механизм действия взрыва. Варьированием конфигурациями и междурядными замедлениями показаны возможности направленного действия взрыва на характер изменения горного массива. Это определяет суть методологии управления геомеханическим состоянием массива горных пород. Физически это осуществляется взрывами встречных зарядов на различные фрагменты массива горных пород, расположенные между ними. Взрыв пучкового заряда, эквивалентный по энергии единому заряду, способен рассредоточить взрывчатое вещество в нескольких рядах сближенных зарядов меньшего диаметра с различным их расположением. При этом механизм взрывного процесса существенно отличается от стандартного сценария, что позволяет использовать преимущества его пространственного расположения для решения сложных проблем горного производства. Компьютерным моделированием на базе численного метода сглаженных частиц (SPH) представлены некоторые результаты управления состоянием массива взрывным процессом, анализ которых позволил получить оценочные выводы.

TO CONTROL THE GEOMECHANICAL STATE OF THE ROCK MASS DURING EXPLOSIVE BREAKOUT

S. D. Viktorov¹, V. M. Zakalinsky^{1, *}, I. E. Shipovskii¹, R. Y. Mingazov¹

¹Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: vmzakal@mail.ru

АНАЛИЗ ЕСТЕСТВЕННОЙ ТРЕЩИНОВАТОСТИ В ПОРОДАХ КОЛЛЕКТОРАХ ОДНОГО ИЗ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОДНОМЕРНОГО ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

И. А. Воронов^{1,*}, Н. В. Дубиня¹

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

*E-mail: ivanvoronov1996@yandex.ru

Естественные трещины играют решающую роль в фильтрационных процессах, имеющих место при разработке месторождений нефти и газа. Трещины наблюдаются в породах любого происхождения и по генетическому признаку подразделяются на естественные и искусственные трещины. Так как все больше залежей углеводородов разрабатываются в зонах с развитой трещиноватостью коллекторов, а изучение их свойств с использованием стандартных методов, как правило, не дает достаточно качественных результатов, актуально развитие новых методов анализа естественной трещиноватости, в частности, с использованием результатов геомеханического моделирования.

В данной работе представлен пример проведения одномерного геомеханического моделирования на нескольких скважинах одного из месторождений углеводородов Западной Сибири с использованием данных, полученных в ходе комплексирования геофизических исследований скважин и лабораторных экспериментов. Результаты моделирования использованы для прогнозирования естественной трещиноватости пород-коллекторов. В качестве входных данных для геомеханического моделирования использовались каротажные данные, лабораторные исследования керн, конструкция, инклинометрия, литология, стратиграфия, азимутальные развертки электрических свойств пород околоскважинной зоны и другие данные по группе скважин месторождения.

Реконструированы значения и направления главных напряжений, прочностные свойства. По результатам моделирования определены критические значения плотности бурового раствора, которые могут быть впоследствии использованы для расчета устойчивости ствола скважин. Кроме того, определены напряжения, действующие на поверхностях трещин, выделенных в породах околоскважинной зоны по результатам интерпретации азимутальных разверток электрических свойств.

Выполнен анализ того, к каким интервалам глубин приурочены естественные трещины, каковы тенденции в их пространственных ориентациях и положениях, насколько выражено влияние трещин на локальные изменения напряженно-деформированного состояния. Рассмотрена возможность разделения естественных трещин по признаку флюидопроводимости с использованием результатов геомеханического анализа.

Результаты работы демонстрируют перспективность использования геомеханического подхода для планирования и оптимизации разработки месторождений углеводородов, характеризующихся низкой матричной проницаемостью пород-коллекторов и выраженной естественной трещиноватостью.

ANALYSIS OF NATURAL FRACTURING IN ROCKS OF A CERTAIN HYDROCARBON FIELD IN WESTERN SIBERIA BASED ON THE RESULTS OF ONE-DIMENSIONAL GEOMECHANICAL MODELLING

I. A. Voronov^{1,*}, N. V. Dubinya¹

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: ivanvoronov1996@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЙОНЕ СЕВЕРО-КОРЕЙСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА ПУНГЕРИ

И. П. Габсатарова¹, *, И. Н. Соколова¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Обнинск, Россия

*E-mail: ira@gsras.ru

После самого мощного северокорейского ПЯВ 3 сентября 2017 года с $m_b = 6.3$ рядом агентств сообщалось о регистрируемых сейсмических событиях на полигоне Пунгери. По данным [1, 2] был проведен анализ для 14 небольших событий ($M_L = 2.1–3.8$), обнаруженных с помощью детектора взаимной корреляции сигналов после ПЯВ до апреля 2018 г. Первое среди этих событий (03.09.2017 г. в 03:38) известно, как обвал в штольне, 13 событий были идентифицированы как землетрясения на основе спектральных отношений P/S и сходства форм сигналов, было выявлено 4 пары дублетов, имеющих подобные общие черты в записях и спектрах. В исследование были вовлечены записи нескольких станций на территории Южной Кореи, китайская станция MDJ, российская группа Уссурийск (USKR). В качестве вывода было высказано, что «ущерб от ударных волн крупного ПЯВ 3 сентября 2017 г. привел к медленной адаптации среды в окружающем регионе, что повлекло за собой снятие стресса посредством афтершоков».

В декабре 2016 г. в российской сети была открыта станция «Посьет», оснащенная в рамках сотрудничества с Южно-Корейской сейсмологической службой (KIGAM—Korea Institutes of Geoscience and Mineral Resources) сейсмометром CMG-40T (1.0–20 Гц) и удаленная от испытательного полигона примерно на 200 км. За период 2020–2023 гг. эта станция зарегистрировала не менее 20 сейсмических событий с $M_L \geq 2.5$ на территории полигона Пунгери.

Анализ записей станцией «Посьет» событий 2020–2024 гг. показал, что они имеют существенные отличия от записей взрывов и значительное подобие с записями землетрясений 2017–2018 гг. – события были идентифицированы как землетрясения на основе спектральных отношений P/S , для трех из них установлено тесное сходство форм сигналов на протяжении всей записи. Остальные события имеют как общие, так и отличительные черты. Часть землетрясений зарегистрированы еще и станциями «Владивосток», «Полтавка», «Мыс Шульца» и сейсмогруппой Уссурийск (USKR) [2]. В качестве рабочей гипотезы рассматривается индуцированная природа этих землетрясений.

Рассматриваются примеры проявления индуцированной сейсмичности на других ядерных полигонах Северной Евразии: на Семипалатинском испытательном полигоне, Лобнор и Новая Земля.

Литература

1. Kim W.Y., Schaff D., Richards P.G. Location and identification of seismic events around North Korean Nuclear test site following the 3 September 2017 underground nuclear test // Вестник НЯЦ РК. 2018. №. 2. С. 11–19.
2. Маловичко А.А., Габсатарова И.П., Коломиец М.В. Регистрация подземных ядерных испытаний и наведенной сейсмичности в Северной Корее в 2016–2017 гг. российскими сейсмическими станциями // Вестник НЯЦ РК. 2018. №. 2. С. 20–26.

SEISMICITY RESEARCH IN THE PUNGGYERI TEST SITE ON THE NORTH KOREAN REGION

I. P. Gabsatarova¹, *, I. N. Sokolova¹

¹Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Obninsk, Russia

*E-mail: ira@gsras.ru

АНТРОПОГЕННЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ИОНОСФЕРУ ЗЕМЛИ

Г. В. Гивишвили^{1, *}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова, Москва (Троицк), Россия

*E-mail: givi_dom@mail.ru

В первой половине 19 века наиболее информативными технологиями контроля за состоянием верхних слоев атмосферы были методы вертикального радиозондирования ионосферы (ВЗ) и поглощения радиоволн (А1) в ней. И первое указание на то, что антропогенная активность влияет на состояние мезосферы было получено в 1976 г. в ходе экспериментов методом А1 на НИС «Академик Курчатов» в районе Персидского залива. Эксперименты показали аномальное поведение суточного хода электронной концентрации N_e на высотах 60–90 км, которое было объяснено последствиями масштабной добычей нефти в данном регионе. Позже метод ВЗ позволил уточнить, что спектр воздействия техногенной деятельности на верхние слои атмосферы не ограничивается нефтедобычей. Он включает в себя множество других источников их загрязнения и, кроме того, проявляется на высотах термосферы, причем не только над Персидским заливом, но и над территорией бывшего СССР. Этот вид влияния цивилизации на окружающую среду уместно назвать непрерывным.

Мировая сеть станций ВЗ сформировалась к середине 40-х годов прошлого столетия. И результаты круглосуточного мониторинга на них слоев E (90–130 км) и $F2$ (250–350 км) ионосферы показали следующее. Во-первых, долговременные тренды критических частот f_oE и f_oF2 (фактически N_e в нижней и средней термосфере) на всех широтах и долготах претерпевают многолетние направленные тренды, не связанные с индексом солнечной активности R_z . Во-вторых, в 1957–1958 гг. произошли изменения: а) знака тренда с негативного на позитивный; б) характера тренда с синхронного на хаотический; в) скорости тренда в сторону его уменьшения. Но 1957–1958 гг. отметились не столько возмущениями в ионосфере (не получившими широкого освещения в специальной литературе), сколько началом гонки массированных испытаний ядерного оружия и запусков космических аппаратов. Но если ядерные испытания в 1963 г. благополучно завершились, то запуски баллистических ракет не только продолжаются, но и множатся благодаря расширению круга стран, принимающих участие в программе освоения космоса. Четкая временная синхронизация этих двух процессов свидетельствует, на наш взгляд, о том, что радикальная смена долговременных изменений, происходящих в ионосфере, вызвана стартом непосредственного вторжения цивилизации в верхние слои атмосферы. Эту гипотезу подкрепляет и тот факт, что волна возмущений направлена снизу вверх и распространяется со скоростью ~ 12.5 км/год. Этот вид влияния техногенной активности на глобальную экологию целесообразно отнести к разряду импульсных.

Последствия чрезвычайно интенсивного ускорения частоты запусков космической техники будут непредсказуемы до тех пор, пока существующие (статистические) модели атмосферы, подобные NRLMSIS, не включают в свои прогнозы факторы, связанные как с непрерывными, так и с импульсными возмущениями природной среды.

ANTHROPOGENIC PULSE IMPACTS ON THE EARTH'S IONOSPHERE

G. V. Givishvili^{1, *}

¹Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation Russian Academy of Sciences, Moscow (Troitsk), Russia

*E-mail: givi_dom@mail.ru

КАЛЬКУЛЯТОР ОЦЕНКИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТОЛКНОВЕНИЙ АСТЕРОИДОВ И КОМЕТ С ЗЕМЛЁЙ

Д. О. Глазачев^{1, *}, О. П. Попова¹, Е. Д. Подобная¹, В. В. Шувалов¹,
В. В. Светцов¹, Н. А. Артемьева¹, В. М. Хазинс¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: glazachevd@gmail.com

Удары космических тел (КТ) по Земле приводят к возникновению опасных эффектов, которые могут сразу после удара или впоследствии оказать вредное или губительное воздействие на человека, животных и растения, а также на хозяйственные объекты. Одними из наиболее важных и опасных последствий падений астероидов и комет являются разрушения на поверхности Земли, вызываемые ударной волной, и тепловое излучение.

Последствия падения космических тел зависят от характера их взаимодействия с атмосферой. Существует два предельных сценария такого взаимодействия, один из них – это кратерообразующий удар, при котором космическое тело практически не теряет энергию при пролете через атмосферу, и вся энергия идет на образование кратера. Второй сценарий – так называемый «метеорный взрыв», при котором основная энергия выделяется в атмосфере.

Проведенное серийное численное моделирование позволило оценить параметры ударной волны, теплового излучения, энергию сейсмических волн и сейсмическую эффективность для метеорных взрывов и кратерообразующих ударов. Образующийся в результате удара атмосферный плюм поднимается на большие высоты (100–300 км) и порождает атмосферные возмущения, распространяющиеся на расстояния до тысяч километров. Для кратерообразующих ударов важными характеристиками являются размер кратера и параметры слоя выброса из кратера (толщина слоя выброса и количество расплава в выбросах).

Отдельное внимание уделялось переходным вариантам (для ударников диаметром 100–300 м), для которых важно знать, какая часть начальной кинетической энергии выделяется в атмосфере, а какая доступна для образования кратеров. Для быстрых оценок этого соотношения использовали простую квазиэмпирическую модель типа «rancake», чьи параметры откалибровали по результатам численного моделирования.

На основе результатов моделирования были построены аппроксимационные соотношения для быстрой оценки важнейших параметров удара.

Предлагаемые соотношения зависят только от свойств космического объекта (размер, плотность, скорость и угол входа). Они были использованы в специально созданном интернет-калькуляторе «Impact Effects» <http://AsteroidHazard.pro>, позволяющем быстро и достаточно точно оценивать различные эффекты падения космических тел.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900176-3).

IMPACT EFFECTS CALCULATOR. ASSESSING THE CONSEQUENCES OF ASTEROID AND COMET IMPACTS ON THE EARTH

D. O. Glazachev^{1, *}, O. P. Popova¹, E. D. Podobnaya¹, V. V. Shuvalov¹,
V. V. Svetsov¹, N. A. Artemieva¹, V. M. Khazins¹

¹Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: glazachevd@gmail.com

ВАРИАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ «ПЛАСТ – СКВАЖИНЫ» ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КМА

Э. М. Горбунова^{1, *}, А. Г. Иванов¹, С. М. Петухова¹, А. В. Караваев¹, А. Ю. Федоров¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: emgorbunova@bk.ru

В работе представлены результаты прецизионных измерений вариаций температуры и порового давления в системе «пласт-скважина» в процессе разработки железорудных месторождений Курской магнитной аномалии. Пункты наблюдений I и II оборудованы аппаратурно-измерительными комплексами, в состав которых входят датчики уровня PR-36XW, датчик атмосферного давления РАА-33Х и трехкомпонентный сейсмоприемник СПВ-3К. Аналоговый выход датчика 36XW используется для стационарной регистрации с частотой 200 Гц. Данные с цифрового выхода датчика с частотой 25 Гц считываются в течение 0.5 часа при регистрации промышленных взрывов.

Цель исследований – определение диапазонов вариаций температуры и уровня подземных вод и возможных изменений фильтрационных параметров обводненной части надрудной толщи при разработке железорудных месторождений с использованием взрывных технологий. В пункте II в скважине 3, вскрывающей нижний напорный архей-протерозойский водоносный комплекс в интервале 108.2–140.9 м, измерения проведены с 21 по 24 июля 2021 г. продолжительностью от 4.9 до 6.4 часа. Минимальное значение температуры составило 9.64° С, максимальное – 9.695° С. В течение часа при увеличении давления на 0.1 кПа температура уменьшается на 0.005° С.

В пункте I в скважине 2 с октября 2021 по апрель 2024 гг. прослежена взаимосвязь между температурой и уровнем верхнего напорного альб-сеноманского водоносного горизонта, пройденного в интервале 14.5–53.5 м в песчаных отложениях. При подъеме уровня от 7.6 до 10.8 м температура воды уменьшилась на 0.6° С (от 12° С до 11.4° С). Отмеченная закономерность, вероятно, свидетельствует о постепенном восполнении естественных ресурсов подземных вод.

За 2.5 года синхронная регистрация температуры и давления в верхнем горизонте выполнена при 6 взрывах в камерах шахты и 31 взрыве в карьере. В двух случаях отмечено увеличение температуры на 0.045° С и 0.07° С в течение 1 сек при проведении взрывов в западном борту карьера при вариациях порового давления в системе «пласт-скважина» 1.9 и 2.6 кПа соответственно. При взрыве в камере севернее пункта I на приведенном расстоянии 99 м/кг^{1/3} и 4 взрывах в карьере прослежено уменьшение температуры на 0.043° С – 0.058° С при вариациях порового давления от 0.6 до 2 кПа.

Неоднозначные изменения температуры в системе «пласт-скважина» могут быть обусловлены различными механизмами, проявляющимися в околоскважинном пространстве. Кратковременный эффект увеличения температуры, возможно, связан с консолидацией рыхлых отложений при прохождении сейсмических волн от взрывов. Уменьшение температуры, вероятно, происходит из-за притока воды за счет раскрытия микротрещин в железистых кварцитах и разжижения песчаных образований. Подобные косейсмические и постсейсмические вариации температур прослежены при землетрясениях в сейсмоактивных регионах. Исследование отмеченных закономерностей способствует пониманию гидрогеомеханических процессов при сейсмическом воздействии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 23-27-00469).

VARIATIONS IN TEMPERATURE AND PORE PRESSURE IN THE “RESERVOIR-WELLS” SYSTEM DURING THE DEVELOPMENT OF THE KMA IRON ORE DEPOSITS

E. M. Gorbunova^{1, *}, A. G. Ivanov¹, S. M. Petukhova¹, A. V. Karavaev¹, A. Yu. Fedorov¹

¹Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: emgorbunova@bk.ru

КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСА ПРЕДВЕСТНИКОВ ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ КАМЧАТКИ

О. Е. Графеев¹, *

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

*E-mail: ografeev@yandex.ru

Автором рассматривается возможность краткосрочного прогноза землетрясений для территории Камчатки на основе комплекса предвестников, основным из которых является концентрация озона в атмосфере. В основе гипотезы о существовании такого предвестника лежит явление водородной дегазации Земли и водородный цикл разрушения озона [2].

В ходе исследования рассматривались данные по Камчатскому региону за период с августа 2010 г. по май 2014 г. Ранее автором была доказана статистическая взаимосвязь между концентрацией озона и землетрясениями магнитудой 5 и более [1]. В развитие ранее полученных результатов исследована взаимосвязь с фазами Луны и вулканической активностью на территории региона, рассмотрена возможность использования форшоков для уточнения прогноза.

Полученные результаты позволяют выделить комплекс предвестников, указывающих на высокую вероятность землетрясения на сроках 1 и 8 суток. Следует отметить, что для практического применения разрабатываемой методики необходимо ее дальнейшее совершенствование, направленное на снижение количества «пропусков цели» и повышение пространственной точности прогноза.

Литература

1. Графеев О.Е. Аномалии озонового слоя как предвестник землетрясений на Камчатке // Континентальный рифтогенез, сопутствующие процессы: Материалы V Всероссийской конференции с участием иностранных ученых, посвященной памяти академика Н. А. Логачева в связи с 95-летием со дня рождения. Иркутск. 2024. С. 33–34.

2. Сывороткин В.Л. Озонная методика изучения водородной дегазации Земли // Альманах Пространство и Время [Электронное научное издание]. Т. 4. Вып. 1. 2013. Специальный выпуск «Система планета Земля».

SHORT-TERM EARTHQUAKE FORECAST BASED ON A SET OF PRECURSORS FOR THE TERRITORY OF KAMCHATKA

O. E. Grafeev¹, *

¹National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

*E-mail: ografeev@yandex.ru

ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ: ОБЗОР И КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Г. А. Гридин^{1, *}, В. А. Новиков^{1, 2}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: gagridin@gmail.com

Явление электромагнитной триггерной сейсмичности было установлено более 30 лет назад при анализе полевых экспериментов по инъекции импульсов постоянного тока в земную кору с использованием источников различной мощности (импульсных МГД-генераторов и электроимпульсной установки ЭРГУ-600) в различных геолого-геофизических условиях (Памири Северный Тянь-Шань). Лабораторными экспериментами на различном оборудовании (прессах и пружинно-блочных моделях) было показано, что импульсы электрического тока, подаваемые в образцы горных пород и в контактную межблочную зону моделей разлома земной коры в субкритическом напряженно-деформированном состоянии приводят не только к росту акустической эмиссии (трещинообразованию), но и к макроэффектам (разрушению образцов и резкому срыву блока в пружинно-блочной модели – лабораторному «землетрясению»). Тем не менее, механизм взаимодействия электрического/электромагнитного поля с горными породами, объясняющий инициирование землетрясений в натурных условиях, до сих пор не понят. Численные оценки растекания тока в земной коре от диполя с использованием геоэлектрических моделей Северного Тянь-Шаня показывают, что плотности тока на глубине 5–10 км, где в основном расположены эпицентры региональных землетрясений, составляют 10^{-6} – 10^{-8} А/м², что на 6–8 порядков ниже плотности тока, при котором в лабораторных условиях наблюдались эффекты инициирования разрушения образцов и лабораторных «землетрясений» при электрическом воздействии. С целью выдвижения рабочих гипотез о возможном физическом механизме или комбинации механизмов, приводящих к инициированию землетрясений при электрическом/электромагнитном воздействии на земную кору, и последующей их проверки в лабораторных условиях сделан обзор предложенных ранее моделей электромагнитной триггерной сейсмичности и их критический анализ с точки зрения их работоспособности при столь низких плотностях тока, характерных для полевых условий. Показано, что ни один из предложенных ранее механизмов преобразования электрической энергии в дополнительные механические напряжения в земной коре (джоулев нагрев флюида, повышение внутривещного давления, пьезоэффекты, двойные электрические слои в трещинах) или снижение прочности горных пород за счет повышенного трещинообразования или магнитоупругости не может объяснить электромагнитную триггерную сейсмичность, наблюдаемую не только в полевых экспериментах, но и при электромагнитном воздействии сильных вариаций космической погоды, приводящем к генерации в разломах теллурических токов такой же плотности (до 10^{-6} А/м²). Наличие задержки сейсмического отклика в течение нескольких суток на импульсное электромагнитное воздействие, как искусственное, так и естественное, указывает на возможную диффузию и миграцию флюида в разломную зону, инициированную электрическим током, который даже при его низких амплитудах может приводить к декольматации трещин и повышению проницаемости горных пород с соответствующим снижением механической и фрикционной прочности сейсмогенного разлома (по аналогии с существующими объяснениями динамической триггерной сейсмичности).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 24-27-00205).

PHYSICAL MECHANISMS OF ELECTROMAGNETIC EARTHQUAKE TRIGGERING: OVERVIEW AND CRITICAL ANALYSIS

G. A. Gridin^{1, *}, V. A. Novikov¹

¹Sadovsky Institute of geosphere dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: gagridin@gmail.com

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ РАЗЛОМА ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КАНТОРА РАЗМЕРОВ ПЯТЕН АСПЕРИТИ В 1D ПОСТАНОВКЕ

Г. А. Гридин^{1, *}, А. А. Остапчук¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: gagridin@gmail.com

Релаксация тектонических напряжений, накапливаемых в верхней части земной коры, происходит в основном при фрикционном скольжении по разломам. Структура разломных зон является неоднородной, состоящей из отдельных сегментов. В пределах одного и того же разлома существуют сегменты с различным поведением, от динамического срыва до асейсмического крипа. Горные породы, со свойствами скоростного разупрочнения, формируют преимущественно участки нуклеации сильных землетрясений. На сегментах, представленных веществом со свойствами скоростного упрочнения, накопленные напряжения релаксируют посредством медленного скольжения и асейсмического крипа. В данной работе будет рассмотрен результат численного моделирования разломной зоны в 1D постановке с различными фрикционными и структурными параметрами в программном пакете QDYN (Quasi Dynamic earthquake cycle simulator). Отличительной особенностью данных расчетов является методика задания структуры разломной зоны, а также фрикционных параметров настоящего геологического вещества (полученных по результатам лабораторного моделирования). Структура разлома задавалась в виде совокупности зон со свойствами скоростного упрочнения или разупрочнения. В рамках моделирования изменялась плотность распределения асперити и их свойства. В результате численных экспериментов получены закономерности изменения во времени скорости скольжения разлома, накопленной энергии деформаций и касательных напряжений на разломе. При задании распределения зон асперити в виде канторова множества наблюдалась нерегулярная картина инициирования событий. При фрактальном распределении зон асперити события иницируются непрерывно, а наиболее сильные динамические подвижки происходят квазирегулярно. Численные эксперименты явно показали, что одним из важнейших факторов, определяющих скорость подвижек по разлому, является пространственное распределение пятен асперити.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 24-27-00205).

NUMERICAL MODELING OF FAULT SLIP VELOCITY FOR THE CANTOR DISTRIBUTION OF ASPERITY SPOT SIZES IN 1D FORMULATION

G. A. Gridin^{1, *}, A. A. Ostapchuk¹

¹Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: gagridin@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ НА ИЗМЕНЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА ПРИ ПОМОЩИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА В РАЙОНЕ ЦЕНТРАЛЬНО-САХАЛИНСКОГО РАЗЛОМА

С. А. Гуляков¹*, И. П. Дудченко¹, Л. М. Богомолов¹, Д. В. Костылев¹, Н. В. Костылева¹, Н. С. Стовбун¹

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

*E-mail: gulyakov_97@mail.ru

За последнее столетие в исследованиях землетрясений накоплен обширный материал, который продолжает непрерывно дополняться новыми сведениями о структуре сейсмичности и влиянии на нее всего многообразия факторов естественной и антропогенной природы. Особенностью этого состояния является значительное изменение деформации при небольших вариациях напряжения, которые могут возбуждаться при воздействии внешних факторов. Отсюда вытекает принципиальная возможность триггерных эффектов – переходов от одного метастабильного состояния к другому под влиянием внешних воздействий даже небольшой интенсивности, в том числе электромагнитных воздействий. Ранее был установлен триггерный эффект электромагнитного поля по кратковременной активизации сейсмичности, вариациям ее характеристик и скорости сейсмотектонических деформаций в период ЭМ воздействий при зондированиях земной коры с применением магнитогидродинамических (МГД) генераторов и электроразведочной генераторной установки ЭРГУ-600-2 (в средней Азии на полигоне в г. Бишкек). В России остров Сахалин, по мнению организаторов этих работ, может быть перспективным районом для продолжения натурных экспериментальных работ в целях разработки моделей по снижению сейсмической опасности. Учитывая отсутствие возможности использования мощных геофизических установок, в ИМГиГ ДВО РАН с 2018 г. ведутся разработки электроимпульсной геофизической установки меньшей мощности (но более мобильной и недорогой) для проведения подобных экспериментов. В целом эти работы являются составляющей комплексного многолетнего исследования (начиная с работ по МГД) и должны внести вклад в разработку модели, объясняющей электросейсмические преобразования в геосреде. Одним из важных факторов (или посылов) при проведении этой работы является также выход в регионы с иными условиями геологического строения или сейсмической активности. В 2020 г. были проведены первые эксперименты на территории Сахалинской области в районе Центрально-Сахалинского разлома в с. Петропавловское. Там был организован геофизический полигон для регистрации сейсмических волн в широком диапазоне частот. Экспериментальные зондирования проводились в 2021–2022 гг., в результате которых был установлен эффект возрастания уровня сейсмоакустических шумов в поверхностных слоях вблизи источника — возбуждающего электрического диполя. Вероятно, что обнаруженная реакция среды не что иное, как разновидность обратного сейсмоэлектрического эффекта II рода.

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF EXPERIMENTAL SOUNDINGS ON CHANGES IN SEISMIC NOISE WITH USING AN ELECTRIC PULSE GEOPHYSICAL GENERATOR IN THE AREA OF THE CENTRAL SAKHALIN FAULT

S. A. Gulyakov¹*, I. P. Dudchenko¹, L. M. Bogomolov¹, D. V. Kostylev¹, N. V. Kostyleva¹, N. S. Stovbun¹

¹Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Yuzhno – Sakhalinsk, Russia

*E-mail: gulyakov_97@mail.ru

ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОТРЕЩИН В ПРОЦЕССЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД: РЕНТГЕНОВСКАЯ МИКРОТОМОГРАФИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Е. Е. Дамаскинская^{1, *}, В. Л. Гиляров¹, Д. И. Фролов¹, Ю. С. Кривоносов², А. В. Бузмаков², В. Е. Асадчиков²

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

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

*E-mail: Kat.Dama@mail.ioffe.ru

Цель работы состояла в прямом наблюдении и дальнейшем анализе дефектов, развивающихся в объеме образца горной породы под действием одноосной сжимающей нагрузки. Исследовалось развитие разрушения в цилиндрических ($d = 10$ мм, $h = 20$ мм) образцах песчаника Berea. Для детектирования дефектов в объеме использовалась рентгеновская компьютерная томография. Особенность экспериментов состоит в том, что выполнялась томографическая съемка образца, находящегося под действием нагрузки. Было разработано специальное переносное нагружательное устройство, которое обеспечивало необходимую нагрузку, помещалось в камеру томографа и не препятствовало качественной съемке образца.

Исследование дефектной структуры образцов горных пород методом рентгеновской микротомографии проводили с помощью конусно-лучевого томографа [1]. Томограф оснащен рентгеновской трубкой с размером фокусного пятна ~ 20 мкм и CCD-детектором Ximea с размером пикселя 8.5 мкм. Пространственное разрешение томографических изображений составляло ~ 10 мкм. Измерения проводили при ускоряющем напряжении 80 кВ. Для уменьшения «эффект чаши», который является артефактом и возникает вследствие «ужесточения» полихроматического пучка при прохождении через образец, между рентгеновским источником и образцом устанавливали Al-фильтр толщиной 0.36 мм. Проекционное увеличение составляло $M = 3.0$.

В процессе эксперимента нагрузка на образце увеличивалась поэтапно. После каждого увеличения нагрузки выполнялась томографическая съемка. Эксперимент заканчивался, когда образец терял целостность. В результате мы смогли проследить развитие микротрещин. Важно отметить, что в течение всего эксперимента разгрузка образца не происходила.

На основе анализа томографических срезов были построены трехмерные модели дефектной структуры. В данной работе в качестве количественной характеристики дефектной структуры была выбрана фрактальная размерность (ФР), которая вычислялась методом *box counting* (BCM). Установлено, что в процессе эволюции дефектной структуры ФР изменяется от 1.8 при образовании трещины до 2.6 при дальнейшем развитии, вызванном увеличением нагрузки. Это означает, что в начале трещина является ажурной и близкой по размерности к плоскости, а затем ее форма становится более разветвленной и занимает, практически, весь объем образца.

Для того, чтобы выявить связь процессов, протекающих на микроуровне с макроскопическими проявлениями, построена компьютерная модель разрушения гетерогенного материала. Использовалась модель связанных частиц [2] (BPM – *bonded particle model*), которая помогает детально изучить эволюцию дефектов. Расчеты методом дискретных элементов (DEM) производились в свободно распространяемом пакете программ MUSEN [3]. Модель материала (горной породы) представляет собой совокупность сферических частиц одного или разных размеров, соединенных связями, которые имитируют межзеренные границы. В модели BPM зарождение трещин определяется разрывом связей между частицами, а их распространение – слиянием множества разорванных связей.

Компьютерные эксперименты позволили выявить детали образования фрактальных структур очагов разрушения. Эти очаги образуются вблизи поверхности образца и представляют собой трещины близкие к плоским с ФР ~ 2 . Их рост приводит к тому, что разрушение захватывает все больший объем, что сопровождается увеличением фрактальной размерности.

Хорошее согласие результатов компьютерного моделирования и лабораторных экспериментов позволяет говорить об адекватности предложенной модели. Мы полагаем, что данную модель можно

рассматривать как инструмент для исследования влияния локальных факторов (неоднородность зерен и их границ по размерам и механическим свойствам, деформации и т.д.) на макроскопическое поведение нагруженной горной породы.

Литература

1. Кривоносов Ю.С., Бuzмаков А.В., Григорьев М.Ю., Русаков А.А., Дымшиц Ю.М., Асадчиков В.Е. Лабораторный конусно-лучевой рентгеновский микротомограф // Кристаллография. 2023. Vol. 68 (1). P. 160–165.
2. Potyondy D.O., Cundall P.A. Abonded-particle model for rock // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2004. Vol. 41. P. 1329–1364.
3. Dosta M., Skorych V. Software X. Evolution of microcracks during rock deformation: X-ray microtomography and discrete element modeling. 2020. Vol. 12. P. 100618.

EVOLUTION OF MICROCRACKS DURING ROCK DEFORMATION: X-RAY MICROTOMOGRAPHY AND DISCRETE ELEMENT MODELING

Е. Е. Damaskinskaya^{1,*}, V. L. Hilarov¹, D. I. Frolov¹, Y. S. Krivonosov², A. V. Buzmakov², V. E. Asadchikov²

¹*Ioffe Institute, Saint Petersburg, Russia*

²*National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*

*E-mail: Kat.Dama@mail.ioffe.ru

ЧТО ВЗВОДИТ ТРИГГЕРЫ?

В. И. Данилов¹, *

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: danvlad@bk.ru

Человечество всегда интересовал вопрос строения Земли, начиная от модели плоской формы, затем исследования привели к принятию формы шара. Появившиеся сейчас данные позволяют по косвенным проявлениям и данным измерений определить внутреннюю структуру (модель) планеты. Одновременно удалось определить и происходящие в теле процессы, приводящие к «взводу» триггеров, при срабатывании которых происходят сейсмические события.

Объяснение несостоятельности современного представления структуры планеты.

Показаны явные противоречия в принятой модели планеты, приводящие к ложным выводам.

На основе данных измерений гравитационных сил и аналогах, наблюдаемых в реальной жизни, показано другое строение Земли, другое распределение масс.

Объяснение как образуется диполь внутри тела планеты, движение которого приводит к появлению электрического тока и Магнитного поля. Тем самым решается вопрос, не решенный Эйнштейном, природы МП.

Показано как может происходить накопление масс внутри планеты, какие процессы предваряют сейсмические события - «взвод» триггера, какие проявления наблюдаются при срабатывании триггера.

Объяснение сил, приводящих в движение воды океанов, создающих основные экваториальные океанические течения. Объяснение наблюдаемых тектонических подвижек, образованию экваториальных воздушных потоков. Предлагается объяснение, как поддерживается высокая температура внутри планеты.

Предложенный подход позволяет объяснить и некоторые явления наблюдаемые на других планетах Солнечной Системы, не видимые на Земле.

Объяснение многих природных явлений одной причиной позволяет сократить количество гипотез и сосредоточиться на изучении этой причины, имеющей несколько проявлений.

Хочется надеяться на то, что другой подход будет способствовать развитию наук, изучающих природу.

WHAT CHARGES THE TRIGGER

V. I. Danilov¹, *

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: danvlad@bk.ru

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСЕТИНСКОГО СЕКТОРА БОЛЬШОГО КАВКАЗА В ЗАДАЧАХ СИСТЕМНОЙ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Б. А. Дзедобов^{1,3,*}, А. Д. Гвишиани^{1,2}, В. Н. Татарин^{1,2}, В. И. Кафтан¹, А. И. Маневич^{1,4},
Б. В. Дзеранов^{1,3}, Р. В. Шевчук^{1,2}, Д. Ж. Акматов^{1,4}, И. В. Лосев¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук, Москва, Россия

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

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

⁴Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Россия

*E-mail: b.dzeboev@gcras.ru

Осетинский сектор Большого Кавказа включает в себя регионы и территории активного туристско-рекреационного освоения. В частности, в настоящее время в республике Северная Осетия-Алания (РСО-А) ведется строительство горнолыжного комплекса мирового уровня «Мамисон». В горной части изучаемой территории расположены и эксплуатируются множество объектов повышенной ответственности. Учитывая многофакторность геодинамических процессов, неполноту наших знаний о геологической среде и неоднозначность сейсмотектонических моделей решение задачи адекватной оценки сейсмической опасности может быть достигнуто только на основе комплексирования геологических, геодезических, геофизических методов и методов численного моделирования. В докладе будут представлены первые результаты комплексных геодинамических исследований, которые призваны заложить методические основы системной оценки сейсмической опасности региона.

На картах ОСР-97, 2015 и 2016 гг. территория РСО-А расположена в 8–9-балльных зонах. При этом на картах ОСР-97А и ОСР-2015А вся горная и предгорная части отнесены к 9 баллам. Результаты исследований по детальному сейсмическому районированию показывают, что большая часть территории расположена в 7–8-балльных зонах. Для территории РСО-А существует карта зон возможных очагов землетрясений. На ней выделены 11 зон ВОЗ, для которых отмечается общее увеличение значений $M_{\max}$ с севера на юг, от Предкавказского прогиба с $M_{\max} = 5.0$ к подвижной системе Большого Кавказа с $M_{\max} = 7.5$.

Проведены исследования по созданию наиболее полного объединенного каталога землетрясений Осетинского сектора Большого Кавказа с унифицированной магнитудной шкалой. Для этого использовался алгоритм объединения каталогов, базирующийся на авторской модификации метода ближайшего соседа. Созданный объединенный каталог интегрирует в себе все доступные данные из сборников ФИЦ ЕГС РАН «Землетрясения в СССР», «Землетрясения Северной Евразии», «Землетрясения России», сборника «Сейсмический бюллетень Кавказа» (Институт геофизики АН Грузинской ССР) и каталога ISC. Каталог охватывает период с 1962 по 2022 гг. Объединение советских и современных российских и грузинских каталогов позволило существенно повысить полноту и представительность сейсмических событий в изучаемом регионе.

Территория Большого Кавказа имеет уникальную историю инструментальных геодезических измерений современных движений земной коры: начиная с 1920-х годов – методом высокоточного повторного нивелирования, а с 1990-х годов – методом ГНСС. В рамках проекта впервые было выполнено системное обобщение и анализ изученности современных вертикальных движений земной коры (СДЗК) на территории Большого Кавказа за более чем вековую историю геодезических измерений. Тектоника и морфология Кавказа прямо указывают на существенную роль вертикальных движений в построении геодинамических моделей и, следовательно, их полезность при оценке сейсмической опасности региона. Сильные землетрясения происходят в периоды завершения быстрых вертикальных движений в течение первых десятилетий после таковых с примерной повторяемостью одно событие за 6 лет.

Переходя от региональных исследований Центрального Кавказа к более детальным исследованиям Осетинского сектора Большого Кавказа, был сформирован геодинамический полигон для выполнения режимных наблюдений за современными движениями земной коры территории исследования. Сформирована геодезическая сеть для деформационного ГНСС-мониторинга восточной части и отдельно узла сочленения Восточной и Западной ветвей Владикавказского разлома. Сформированный полигон в настоящее время включает в себя 37 геодезических пунктов. В настоящий момент в проекте развиваются геомеханические модели региона, в частности разрабатывается современная карта напряженного состояния PCO-A, основанная на геодезических, геофизических, сейсмологических и геологических данных. Иерархический подход и системная многофакторная оценка геолого-геофизических данных являются основой для адекватной оценки сейсмической опасности региона.

GEODYNAMIC STUDIES OF THE OSSETIAN SECTOR OF THE GREATER CAUCASUS IN THE PROBLEMS OF SYSTEMIC ASSESSMENT OF SEISMIC HAZARD: FIRST RESULTS

**B. Dzeboev^{1,3,*}, A. Gvishiani^{1,2}, V. Tatarinov^{1,2}, V. Kaftan¹, A. Manevich^{1,4}, B. Dzeranov^{1,3}, R. Shevchuk^{1,2},
D. Akmatov^{1,4}, I. Losev¹**

¹*Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³*Geophysical Institute – the Affiliate of Vladikavkaz Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Vladikavkaz, Russia*

⁴*National University of Sciences and Technology "MISIS", Moscow, Russia*

**E-mail: b.dzeboev@gcras.ru*

О МИКРОТРЕЩИНАХ В МИНЕРАЛАХ КАК ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ТРИГГЕРАХ РАЗРЫВОВ

Н. И. Дьяур¹, *, А. В. Чистякова¹, Т. Э. Багдасарян¹

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

*E-mail: dyaur@ifz.ru

Результаты деформирования горных пород в контролируемых экспериментальных условиях и обработка данных с помощью дискретного мониторинга микротрещин в горной породе сканирующим электронным микроскопом (СЭМ) должны учитываться при исследовании процесса разрушения в горных породах. На наш взгляд, необходимо уделить внимание поведению отдельных минералов при деформировании и подготовки разрушения из-за неоднородности состава среды. Нами проведены эксперименты с циклами нагружения гранитоида на установке GCTS RTR4500 и наблюдения на СЭМ TESCAN MIRA IV LMS в ЦКП ИФЗ РАН. Изображения поверхности образцов были получены в режимах вторичных электронов (SE) и обратно-отраженных электронов (BSE).

Дискретный мониторинг СЭМ показал, что кроме трещин, зафиксированных в результате формирования разрыва образца, важным фактором является и обнаружение сформированных микротрещин в отдельных минералах образца гранитоида, которые зависят от физических свойств минералов, их спайности, анизотропии. Наблюдения акустической эмиссии свидетельствуют о развитии трещинообразования уже на начальных этапах упругого деформирования.

В работе [1] показано, что при ударе в зернах минералов плагиоклаза, калиевого ПШ появляются микротрещины, и в доказательство приводятся совпадения максимумов интенсивности флуоресценции с колебаниями в образце гранита. В наших наблюдениях после циклов нагружения и разрыва выявилось, что у части минералов с совершенной спайностью (биотит, плагиоклаз, КПШ) обнаруживаются микротрещины, развитые по спайности. Формируются микротрещины спайности, как правило, в пределах зерна минерала. В исходных снимках для этих же фрагментов сканирования СЭМ микротрещины отсутствовали.

В условиях земной коры следует совместно учитывать возможность таких факторов воздействия на разрыв горной породы, как близкие динамические воздействия, образование трещин в горных породах и микротрещин в минералах с совершенной спайностью, а также заполнение флюидом, изменение прочностных характеристик пород с микротрещинами и различным поровым давлением флюидов.

Литература

1. Веттегрень В.И., Куксенко В.С., Щербаков И.П. Динамика микротрещин и временные зависимости деформации поверхности гетерогенного тела (гранита) при ударе // Физика твердого тела. 2012. Т. 54. № 7. С. 1342–1346.

ABOUT MICROCRACKS IN MINERALS AS POTENTIAL TRIGGERS OF RUPTURES

N. I. Dyaur¹, *, A. V. Chistyakova¹, T. E. Bagdasaryan¹

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: dyaur@ifz.ru

ПРОГНОЗ ПОВЕДЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРУЕМОГО СОСТОЯНИЯ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ПОМОЩИ РЕКУРРЕНТНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Н. А. Егоров¹, *

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

*E-mail: kolyaeg19921@gmail.com

В лабораторных условиях при проведении геомеханических испытаний определяются физико-механические свойства горных пород. Для этого может быть использована испытательная установка, которая позволяет создавать пластовые условия путём обжимного давления внутри камеры установки. В результате испытания образцов горных пород получают диаграмму деформирования, по которой определяются упругие параметры, такие как модуль Юнга и коэффициент Пуассона. Помимо этого, кривые напряжение-деформация дают информацию о переходе образца горной породы из упругой области деформирования в пластичную, а также в область разрушения.

В данной работе, на основе большого объема данных, полученных по результатам лабораторных геомеханических испытаний горных пород, было проведено обучение модели нейросети и прогнозирование поведения кривых напряжение-деформация на предполагаемых неизвестных участках диаграмм деформирования. Для этого была использована модель LSTM (Long Short-Term Memory) – тип рекуррентной нейронной сети, способной улавливать долгосрочные зависимости в последовательных данных. Модель эффективна в анализе временных рядов, что подходит для прогнозирования кривых напряжение-деформация. В процессе обучения нейронной сети на её вход подаются различные параметры, такие как напряжение, деформация и давление в испытательной камере, а также другие признаки испытываемых образцов, например, плотность или пористость породы. Эти данные представляют собой многомерную последовательность. Выходными данными нейронной сети являются значения напряжений в следующем интервале последовательности данных, которые следуют за входным интервалом. LSTM нейронная сеть обрабатывает эти последовательности и пытается выявить зависимости между входными данными и желаемыми выходными, то есть предсказать будущие значения напряжения и деформации на основе прошлых наблюдений.

Использование LSTM нейронной сети для прогнозирования поведения напряженно-деформируемого состояния горных пород может помочь инженерам и геологам более точно предсказывать предельные нагрузки на грунты и сценарий разрушения, что может быть необходимо при геотехническом проектировании и строительстве. С помощью LSTM нейронных сетей можно получить более точные по сравнению с регрессионными моделями прогнозирования значения упруго-прочностных параметров для геомеханической модели скважины. Упруго-прочностные параметры необходимы для решения таких задач, как оценка устойчивости ствола скважины и определение плотности бурового раствора. Обученная модель показала достаточно точные по сравнению с экспериментальными данными результаты прогнозирования на тестовом наборе данных. Дальнейшие исследования могут быть направлены на улучшение модели с учетом дополнительных признаков у исследуемых горных пород, таких как структура порового пространства, гранулометрический состав, степень цементации и другие.¹

FORECASTING THE BEHAVIOR OF STRESS-STRAIN STATES OF ROCK SAMPLES USING A RECURRENT NEURAL NETWORK

N. A. Egorov¹, *

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: kolyaeg19921@gmail.com

¹ При проведении работ была использована сервогидравлическая установка GCTS RTR 4500 в Центре коллективного пользования ИФЗ РАН.

НОВЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОЧАГОВЫХ ЗОН СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

А. Г. Епифанский¹, И. Н. Соколова¹, И. П. Габсатарова¹, *

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Обнинск, Россия

*E-mail: ira@gsras.ru

В последние годы во всем мире функционирует несколько десятков тысяч широкополосных чувствительных трехкомпонентных сейсмических станций и десятки сейсмических групп, данные которых доступны исследователям в режиме реального времени. Использование системы GPS для привязки и синхронизации временной шкалы на всех сейсмических станциях, а также использование возможностей цифровой обработки волновых форм позволило расширить количество методик определения параметров сейсмических событий. Наряду с традиционными инструментами локализации сейсмических событий, с использованием годографов основных типов сейсмических волн, развиваются корреляционные методы, статистический Байесовский метод определения положения гипоцентра и времени в очаге, методы обработки сейсмических групп на основе FK-анализа, а также прогрессивного многоканального корреляционного метода РМСС и др. Несмотря на большое количество данных и алгоритмов обработки до сих пор нет надежного метода оценки глубины сейсмического события, отсутствуют методы выделения субочагов сильных землетрясений, определения параметров событий с протяженным на десятки километров очагом и пригодным для рутинной обработки и автоматической обработки.

В работе [1] приводится обоснование метода, основанного на выделении из сейсмической записи парных сейсмических фаз P и pP для каждого очага из очаговой зоны, и совокупной обработки сейсмических записей, основанного на свойствах эмерджентности. Основным результатом анализа являются выделение спонтанных структурных образований, на которые ранее не обращали внимание. Анализируется структуризация времен вступлений сейсмических волн в зависимости от глубины очага сейсмического события. Одним из обнаруженных результатов оказалось, что применение в процедуре локализации записей сейсмических событий (сейсмограмм) станций, расположенных во всем диапазоне эпицентральных расстояний, приводит к снижению точности, а порою и к необоснованному результату.

Появление возможности использования цифровых записей в процедуре локализации приводит к вопросу об обоснованности термина «глубина» сейсмического события. Оказывается возможным ввести новое определение, основанное не на математическом, а на физическом подходе, учитывающем физическое воздействие анализируемого сейсмического события на окружающую среду. Сделаны попытки перейти к целостному описанию очага и очаговой зоны. Приведены результаты анализа данных обработки событий в целях получения внутренней структуры очаговой зоны. Приводятся результаты обработки нескольких хорошо известных сильных сейсмических событий из района Центральной Азии.

Литература

1. Епифанский А.Г., Дуленцова Л.Г. Модель очаговой зоны и глубины коровых сейсмических событий // Российский сейсмологический журнал. 2022. Т. 4. № 4. С. 24–41. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2022.4.02.EDN: HJAMWX>

NEW METHODS OF INVESTIGATION FOCUS ZONES STRONG EARTHQUAKES

A. G. Epifansky¹, I. N. Sokolova¹, I. P. Gabsatarova¹, *

¹Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Obninsk, Russia

*E-mail: ira@gsras.ru

ИНДЕКС МАСС МЕТЕОРНЫХ ПОТОКОВ ПЕРСЕИД, ОРИОНИД И ГЕМИНИД

В. В. Ефремов^{1, *}, О. П. Попова¹, Д. О. Глазачев¹, А. П. Карташова²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: efremov.vv@phystech.edu

Фундаментальной характеристикой метеороидов в Солнечной системе является распределение частиц по размерам и массе. Частотное распределение массы метеороидов дает представление о происхождении, эволюции и возможном разрушении частиц в планетных системах. Более того, знание распределения масс метеороидов является ключом к оценке общего притока массы космического вещества на Землю.

С другой стороны, изучение индекса масс, профиля светимости и других характеристик метеорных потоков, а, следовательно, и распределение метеорных частиц по массе, является необходимой задачей не только для фундаментальной науки, но и с практической точки зрения – метеорные частицы могут нанести вред работоспособности космических аппаратов. Поэтому необходимо учитывать данные риски при проектировании как самих аппаратов, так и при планировании их траектории и времени запуска.

Оценки массы и размеров частиц проводятся различными методами. Каждый метод основывается на разных параметрах и предположениях. Кумулятивное распределение масс метеороидов описывается степенным законом, показатель степени в котором называется Индексом масс. Индекс масс используется для изучения метеорных потоков и их эволюции.

В данной работе использовались наблюдения, доступные в Интернет, Глобальной Метеорной Сети (GMN) (<https://globalmeteornetwork.org/>). Были рассмотрены метеоры потоков Персеид (2019–2023 гг.), Орионид (2019–2023 гг.), Геминид (2018–2023 гг.). Для каждого потока был рассчитан индекс масс основываясь на фотометрические оценки массы метеороидов и оценки массы по распространенным эмпирическим зависимостям (включающим зависимость от максимальной абсолютной звездной величины, угла и скорости входа метеороида). Были рассмотрены особенности поведения данных потоков в разные годы.

Профиль максимума светимости – функция, которая показывает на какой высоте метеороид с заданной скоростью, плотностью, массой и углом входа имеет максимальную звездную величину. Данный параметр также характеризует распределение частиц по массам внутри потока. Разные авторы по-разному определяют профиль максимума светимости (ионизации), как эмпирическими способами, основываясь на данных наблюдений, так и теоретически, основываясь на моделях абляции. В данной работе был проведен анализ профилей светимости для исследуемых потоков по наблюдательным (по данным из базы GMN) и модельным оценкам. Были выявлены особенности полученных профилей для самих потоков и зависимость поведения потоков за разные годы.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900176-3).

MASS INDEX OF THE PERSEID, ORIONID AND GEMINID METEOR SHOWER

V. V. Efremov^{1, *}, O. P. Popova¹, D. O. Glazachev¹, A. P. Kartashova²

¹Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Science, Moscow, Russia

²Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: efremov.vv@phystech.edu

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ НА ОСНОВЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГРАДИЕНТНОГО ТИПА

Д. С. Журкина¹ *, С. В. Лавриков¹, А. Ф. Ревуженко¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

*E-mail: daria.zhurk@gmail.com

С использованием упругопластической модели горной породы с учетом локальной неоднородности [1] и альтернативной разностной схемы [2] дан расчет напряженно-деформированного состояния и оценена концентрация максимальной нагрузки в приконтурной зоне массива вблизи фронта очистного забоя. Задача решена в упругой и упругопластической версиях модели.

В расчетах варьировалось значение структурного параметра ξ , отвечающего за локальные изгибы частиц среды. Показано, что при $\xi \rightarrow 0$, когда локальная неоднородность не учитывается, решение соответствует классическому упругому либо упругопластическому поведению в зависимости от выбранной модели межзеренных проскальзываний. По мере роста нагрузки на массив значение максимального касательного напряжения на груди забоя растет, а зона повышенной концентрации напряжений развивается от фронта забоя вглубь массива. Увеличение роли локальных изгибов (рост параметра) приводит к некоторому снижению абсолютных значений напряжений, при этом область повышенной концентрации распространяется на значительно большее расстояние вглубь массива от контура выработки. Установлено, что пластические сдвиги развиваются от груди забоя, преимущественно в направлениях действия гравитационного и тектонического напряжений. Область распространения пластических деформаций по мере увеличения роли локальных изгибов уменьшается.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФНИ (проект № 121052500138-4).

Литература

1. Ревуженко А.Ф., Микенина О.А. Упругопластическая модель горной породы с линейным структурным параметром // Прикладная механика и техническая физика. 2018. № 2. С. 167–176.
2. Ревуженко А.Ф., Лавриков С.В., Микенина О.А. Об одной альтернативной разностной схеме численного решения упругих задач определения напряженно-деформированного состояния горного массива // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2020. Т. 7. № 1. С. 131–137.

NUMERICAL ANALYSIS OF STRESS CONCENTRATION IN ZONES OF WORKING FACE INFLUENCE BASED ON THE ELASTOPLASTIC MODEL OF GRADIENT TYPE

D. S. Zhurkina¹ *, S. V. Lavrikov¹, A. F. Revuzhenko¹

¹The Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

*E-mail: daria.zhurk@gmail.com

ЭПОХА ОМОРИ – ЧТО ДАЛЬШЕ?

А. Д. Завьялов^{1,*}, А. В. Гульельми¹, О. Д. Зотов^{1,2}, Б. И. Клайн¹

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

²Геофизическая обсерватория «Борок» Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Борок, Россия

*E-mail: zavyalov@ifz.ru

Главный толчок землетрясения можно рассматривать как типичный триггер, запускающий афтершоковый процесс в его очаговой области. Доклад посвящен рассмотрению процесса эволюции афтершоков. В 1894 г. молодой японский сейсмолог Фусакичи Омори (1868–1923 гг.) опубликовал результат, известный теперь как «закон Омори». Он обнаружил, что после сильного землетрясения частота афтершоков гиперболически уменьшается с течением времени: $n(t) = k/(c + t)$ (1). Здесь $k > 0$, $c > 0$, $t \geq 0$. Сделаем два предположения. Первое предположение: допустим, что закон Омори в форме (1) является точным. Второе предположение состоит в том, что (1) есть решение некоторого дифференциального уравнения, описывающего эволюцию активности афтершоков. Из этих двух предположений следует, что уравнение эволюции имеет вид: $dn/dt + \sigma n^2 = 0$ (2). Здесь $n(t)$ – частота афтершоков, σ – коэффициент деактивации очага землетрясения, «остывающего» после главного удара. Общее решение уравнения (2) имеет форму $n(t) = n_0 [1 + n_0 \int [\sigma(t') dt']^{-1}]$ (3). Легко проверить, что (3) является естественным обобщением закона Омори. Действительно, если $\sigma = \text{const}$, то с точностью до обозначений формула (2) совпадает с классической формой закона эволюции афтершоков, предложенного Омори. Таким образом, можно считать гиперболическую зависимость (1) фундаментальным законом. Более того, это первый закон физики землетрясений. Но в (3) σ не является константой, а является функцией времени. Дифференциальная форма закона Омори (2) и его общее решение (3) дают нам возможность поставить и решить обратную задачу физики афтершоков. Она состоит в том, чтобы вычислить коэффициент деактивации очага по данным наблюдения частоты афтершоков. Сделаем замену переменной $n \rightarrow g = 1/n$. Тогда (2) можно переписать в виде $dg/dt = \sigma$. Формально мы решили обратную задачу, но на практике решение оказывается неустойчивым из-за сильной флуктуации исходной функции $n(t)$. Регуляризация в данном случае состоит в замене $g \rightarrow \langle g \rangle$, где угловые скобки означают операцию сглаживания. В результате решение приобретает вид: $\sigma = d\langle g \rangle / dt$ (4). Опыт свидетельствует о том, что коэффициент деактивации $\sigma(t)$ испытывает сложные вариации, но на первом этапе эволюции $\sigma = \text{const}$. Соответствующий интервал времени был назван нами эпохой Омори. В эпоху Омори выполняется классический закон Омори (1). В результате анализа поведения коэффициента деактивации для нескольких десятков главных толчков было установлено, что коэффициент деактивации в эпоху Омори тем меньше, чем больше магнитуда главного удара. Была обнаружена также некоторая тенденция к увеличению длительности эпохи Омори с ростом магнитуды основного толчка. Что же происходит в очаге после окончания эпохи Омори? Как ведет себя коэффициент деактивации по ее окончании? Оказалось, по окончании эпохи Омори состояние очага изменяется. Введем параметр $\theta = d\sigma/dt$. В эпоху Омори $\theta = 0$. О переходе к новому состоянию свидетельствует резкий скачок параметра θ . Это говорит о том, что окончание эпохи Омори сопровождается бифуркацией очага землетрясения. Итак, мы приняли на веру закон Омори, переформулировали его, записав в виде уравнения эволюции (2), поставили и решили обратную задачу очага землетрясения и обнаружили существование эпохи Омори, которая заканчивается бифуркацией очага. Таким образом, мы обнаружили закономерный переход очага из одного состояния в качественно иное состояние в процессе релаксации массива горных пород после образования в нем магистрального разрыва.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИФЗ РАН (№ 075-00693-22-00).

THE OMORI EPOCH – WHAT’S NEXT?

A. D. Zavyalov^{1,*}, A. V. Guglielmi¹, O. D. Zotov^{1,2}, B. I. Klain¹

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Borok Geophysical Observatory of the Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Borok, Russia

*E-mail: zavyalov@ifz.ru

ВЛИЯНИЕ ПРЯМОГО ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ В ОДНООСНОСЖАТЫХ ОБРАЗЦАХ

В. А. Зейгарник¹*, В. Н. Ключкин¹, В. А. Новиков¹, В. И. Окунев¹

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

*E-mail: zeigarnik@ihed.ras.ru

В ряде опубликованных работ высказывалось предположение, что влияние электромагнитного воздействия на сейсмический режим в натурных условиях или на процесс трещинообразования в лабораторных экспериментах может быть объяснено ролью джоулева нагрева при прохождении электрического тока через флюидонасыщенные горные породы. Нагрев флюида в поровом пространстве может приводить к росту давления флюида в порах и трещинах, что, в свою очередь, могло стимулировать дополнительное растрескивание твердого скелета горной породы. В данной работе была предпринята попытка прямого нагрева образца в условиях одноосного сжатия с целью выявления роли теплового фактора на процесс трещинообразования. Эксперименты проводились на образцах искусственного песчаника; образцы принадлежали той же партии, что и образцы, ранее изученные в экспериментах по влиянию прохождения электрического тока через образец на характеристики акустической эмиссии и на процесс его разрушения. Тепловой поток в настоящих экспериментах подводился к противоположащим боковым граням образца с помощью элементов Пельтье, представляющих собой обратный термоэлектрический преобразователь. Плотность теплового потока на поверхности образца достигала почти 104 Вт/м²; локальная температура наружной поверхности образца вблизи нагревательного элемента повышалась в процессе нагрева на 10° – 15° в зависимости от длительности включения тока. Эксперименты показали, что даже при столь значительных тепловых потоках влияние нагрева проявляется лишь при нагрузках близких к разрушающим ($K_p \geq 0.95 \div 0.97$), то есть при нагрузках близких к предельным (разрушающим). Эффект нагрева проявлялся в том, что процесс трещинообразования в образце интенсифицировался, а сам образец постепенно переходил в запредельное состояние и, в конце концов, разрушался. При меньших нагрузках прямой нагрев заметного эффекта на процесс трещинообразования не оказывал.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 24-27-00205).

JOINT INSTITUTE FOR HIGH TEMPERATURES RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

V. A. Zeigarnik¹*, V. N. Kliuchkin¹, V. A. Novikov¹, V. I. Okunev¹

¹Joint Institute for High Temperatures Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: zeigarnik@ihed.ras.ru

КРУГОСВЕТНОЕ СЕЙСМИЧЕСКОЕ ЭХО КАК ТРИГГЕР ТЕКТОНИЧЕСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

О. Д. Зотов^{1, 2, *}, А. В. Гульельми²

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

²Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок, Россия

*E-mail: ozotov@inbox.ru

Триггеры землетрясений относятся к одному из двух классов – эндогенные и экзогенные триггеры. Источники эндогенных триггеров располагаются под земной поверхностью, а источники экзогенных над нею. Каждый класс делится на три подкласса: силовые, тепловые и химические триггеры. Подкласс силовых триггеров содержит два вида: механические и электромагнитные. Каждый из этих видов имеет две разновидности: аддитивные и мультипликативные триггеры.

Сущность кумулятивного эффекта кругосветного сейсмического эха состоит в том, что эхо может послужить триггером повторного подземного толчка в эпицентральной зоне землетрясения, породившего эхо. По классификации триггеров кругосветное эхо представляет собой эндогенный силовой механический аддитивный триггер. Кругосветное эхо, возбужденное главным ударом землетрясения, как триггер афтершоков, было подробно исследовано ранее.

В данной работе поставлен и исследован экспериментально вопрос о том, не может ли форшок возбудить кругосветное эхо, которое окажется триггером главного удара. По ходу исследования рассмотрена классификация так называемых триад землетрясений. Триада представляет собой своеобразное триединство форшоков, главного удара и афтершоков. Все триады делятся на три класса, каждый из которых содержит два вида. При изучении одного из шести видов триад обнаружены косвенные признаки того, что ответ на поставленный вопрос может быть положительным.

Исследования выполнены в рамках программ государственных заданий ИФЗ РАН.

AROUND THE WORLD SEISMIC ECHO AS A TRIGGER OF TECTONIC EARTHQUAKE

O. D. Zotov^{1, 2, *}, A. V. Guglielmi²

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences

²Geophysical observatory «Borok» IPhE RAS, Borok, Russia

*E-mail: ozotov@inbox.ru

УДАРНЫЕ КРАТЕРЫ НА ЗЕМЛЕ БОЛЬШЕ НАБЛЮДАЕМЫХ

Б. А. Иванов^{1, *}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. САДОВСКОГО Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: boris_a_ivanov@mail.ru

На Земле найдены следы более чем 180 ударных структур, образованных высокоскоростными ударами космических тел. Наиболее крупные структуры (или их эродированные следы) соответствуют ударным кратерам диаметром до ~ 200 км. Самые большие из них получили название «Большой тройки» («Big Three») – это структуры Садбери (Канада), Вредефорт (Южная Африка) и Чиксулуб (Мексика). Садбери сильно разрушен тектоническими движениями, Вредефорт сохранил более половины исходной кольцевой структуры, но эродирован на глубины 8–10 км, Чиксулуб сохранился хорошо, но погребен под несколькими километрами более молодых осадочных пород. Все эти кратеры имеют возраст менее 2 млрд лет.

На других планетах земного типа сохранились десятки структур диаметром более 200–300 км. Образовавшие их космические тела даже с учетом средней скорости удара и различий в силе тяжести различных планет должны быть больше астероидов, образовавших «Большую тройку» на Земле.

«Большая тройка» земных кратеров продолжает изучаться как геолого-геофизическими методами (включая глубинное бурение), так и методами численного моделирования. В частности, численные модели неплохо воспроизводят морфологию кратеров и перемещение глубинных геологических слоев в месте удара. Исходя из этого, в данной работе мы попытались смоделировать как должны были бы выглядеть Земные ударные кратеры с размером, большим чем у «Большой тройки».

Численное моделирование использовало мишень, похожую по структуре на мишень кратера Вредефорт – гранитная кора поверх мантии из дунита. Исследовались разные варианты возрастания температуры в мишени. Моделировалось образование кратеров при ударе астероидов в два раза и в четыре раза больших астероида, образовавшего кратер Вредефорт.

Результаты моделирования показали отсутствие качественных изменений в картине кратерообразования за исключением заметного возрастания доли ударного расплава, остающегося в пределах кратера с центральным поднятием. Наиболее частым случаем является «захват» части ударного расплава в центральной части модельного кратера, соответствующего кратерам с двумя кольцами, наблюдаемых на планетных телах земного типа.

В пределах вариантов, исследованных в работе, можно предварительно предложить для дальнейшего анализа два сценария: (1) более высокий, чем использованный в модели, градиент температур на Земле в период более 2–3 млрд лет назад, или (2) разрушение и глубокая эрозия ударных структур в этот период эволюции Земли.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900178-7).

TERRESTRIAL IMPACT CRATERS LARGER THAN OBSERVED ONES

B. A. Ivanov^{1, *}

¹Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: boris_a_ivanov@mail.ru

ПОСЛЕДСТВИЯ ТЕХНОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РЕЛЬЕФ

Г. Н. Иванченко^{1, *}, Э. М. Горбунова¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: malkinbv@mail.ru

Рассмотрены последствия крупномасштабных воздействий на состояние поверхности территории Семипалатинского испытательного полигона (СИП) по данным сопоставления архивных топографических карт масштаба 1:100000, размещенных в открытом доступе на сайте <https://satmaps.info>, с современными цифровыми моделями и космическими снимками, представленными на Google Earth. Подробная информация о ландшафте, геологических и гидрогеологических условиях территории исследований приведена в «Интерактивном Атласе СИП», размещенном на сайте <https://sts.nnc.kz/?load>. Подземные испытания проводились в скважинах на площадках «Балапан» и «Сары-Узень» и в горизонтальных горных выработках площадки «Дегелен». Первые две площадки расположены в пределах равнинной местности с абсолютными отметками высот от 200 до 340 м. Площадка «Дегелен» находится в пределах низкогогорья, абсолютные отметки изменяются от 600 до 1000 м.

Особенности геологического строения территории исследований предопределили основные виды поствзрывных деформаций дневной поверхности. В равнинной местности толща осадочных отложений неоген-четвертичного возраста мощностью от 20–30 до 80 м перекрывает палеозойский фундамент, выполненный туфогенно-осадочными образованиями, осложненный интрузиями и разрывными нарушениями разного ранга. Низкогорный массив сложен интрузивными образованиями верхнего палеозоя, представленными гранитами, диоритами, гранодиоритами и перекрыт маломощным чехлом рыхлых отложений, развитым преимущественно в эрозионных врезках и долинах ручьев и распадков. Соответственно в равнинной местности поствзрывные деформации поверхности представлены различно ориентированными буграми пучения, воронками проседаний, серией протяженных трещин, которые отчетливо видны на современных цифровых моделях рельефа. В условиях низкогорья проведение крупномасштабных экспериментов привело к обрушению скальных выступов, формированию техногенных осыпей и провальных понижений.

Прослеживается взаимосвязь и приуроченность техногенных форм рельефа к элементам естественной тектонической делимости палеозойского фундамента. По результатам дешифрирования дистанционных материалов и анализу цифровых моделей рельефа могут быть выделены и оконтурены природно-техногенные блоки, которые характеризуются различной степенью изменения ландшафта. Сопоставление положения и геометрии техногенных форм рельефа с имеющимися геологическими данными картирования территории исследований позволяет проследить участки антропогенного подновления разрывных нарушений и выделить зоны возможной активизации просадочно-деформационных процессов и интенсификации вертикальной инфильтрации. Полученные данные могут послужить основой при разработке моделей прогнозирования опасных экзогенных процессов при техногенном воздействии на геологическую среду.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900172–5).

RESULTS OF TECHNOGENIC IMPACT ON THE RELIEF

G. N. Ivanchenko^{1, *}, E. M. Gorbunova¹

¹Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: malkinbv@mail.ru

ТЕРМИЧЕСКИ СТИМУЛИРОВАННАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ И МИКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ

Г. С. Индаков^{1,2, *}, П. А. Казначеев², З.-Ю. Я. Майбук², А. В. Пономарев², М. А. Матвеев²,
Ю. А. Морозов², Н. Б. Подымова^{1,2}

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

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

*E-mail: indakov.gs16@physics.msu.ru

Исследование разрушения горных пород является важной задачей как в фундаментальной, так и в прикладной области наук о Земле. В то время как разрушение под действием механической нагрузки исследовано достаточно широко, особенности температурного воздействия на породу остаются менее изученными.

В данной работе был проведен сравнительный анализ особенностей процесса термически стимулированного разрушения горных пород разного происхождения на основе статистики импульсов термостимулированной акустической эмиссии (ТАЭ) для образцов горных пород. События АЭ распределены, в основном, по закону Гутенберга – Рихтера [1], что позволяет проводить аналогии между результатами лабораторных экспериментов и параметрами сейсмического процесса.

Для анализа развития разрушения в целом были рассмотрены статистические параметры ТАЭ – активность и *b-value*. Эксперименты с образцами гранитов и базальтов были систематизированы по типу активности для возможности сравнения результатов. Параметр *b-value* был пересчитан для сопоставления с натурными данными [2]. Для объяснения выявленных закономерностей изменения *b-value* предложена интерпретация результатов в рамках модели лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ) [3]. Анализ данных экспериментов с образцами метапесчаников проводился для нескольких циклов нагрева для исследования влияния *pT*-условий формирования породы на развитие разрушения. Была выдвинута гипотеза о возможности наличия взаимосвязей между статистическими параметрами, характеризующими разрушение, и микроструктурой горных пород. Объектом исследования при изучении микроструктуры является зернистая структура горной породы как совокупность зерен, характерные величины каждого из которых измеримы, что позволяет оценить статистические параметры распределения величин (прежде всего, средний размер [4]). В работе рассмотрены методы оценки распределения зерен горных пород по размерам на основе анализа микрофотографий шлифов, полученных на оптическом микроскопе.

*Экспериментальные данные получены в рамках государственного задания
Министерства науки и высшего образования РФ.*

Литература

1. Казначеев П.А., Майбук З.-Ю.Я., Пономарев А.В., Смирнов В.Б., Бондаренко Н.Б. К вопросу об анализе статистики событий акустической эмиссии по данным одиночного датчика в экспериментах с термическим разрушением горных пород // Геофизические исследования. 2019. Том 20. № 1. С. 52–64.
2. Индаков Г.С., Казначеев П.А. Оценка статистических параметров потока импульсов термически стимулированной акустической эмиссии в лабораторных экспериментах // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. 2021. № 1. 2110501
3. Соболев Г.А. Модель лавинно-неустойчивого трещинообразования – ЛНТ // Физика Земли. 2019. № 1. С. 166–179.
4. Papadakis E.P. From micrograph to grain size distribution with ultrasonic applications // J. Appl. Phys. 1964. Vol. 35 (5). P. 1586–1594.

THERMALLY STIMULATED ACOUSTIC EMISSION IN ROCKS AND MICROSTRUCTURAL ANALYSIS

G. S. Indakov^{1,2, *}, P. A. Kaznacheev², Z.-Y. Y. Maibuk², A. V. Ponomarev², M. A. Matveev²,
Y. A. Morozov², N. B. Podymova^{1,2}

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²Schmidt institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: indakov.gs16@physics.msu.ru

ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА СЛАЙДЕР-МОДЕЛИ РАЗЛОМА: ВЛИЯНИЕ УВЛАЖНЕНИЯ ЗОНЫ РАЗЛОМА НА ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

**П. А. Казначеев^{1,*}, З.-Ю. Я. Майбук¹, А. В. Пономарев¹, Г. А. Соболев¹, А. В. Патонин¹,
В. В. Кох¹, Д. В. Краюшкин^{1,2}, Н. А. Закржевская¹, И. Н. Мигунов¹**

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

²Национальный исследовательский университет «ВШЭ» (НИУ ВШЭ), Москва, Россия

*Email: p_a_k@mail.ru

В работе приводятся результаты экспериментов на лабораторной слайдер-модели сейсмогенного разлома. Экспериментальная установка представляла собой рычажный пресс, усилие которого через два пуансона приложено к двум блокам горной породы (мелкозернистый гранит), прижатым друг к другу. Усилие передается через пружинный динамометр, что обеспечивает возможность точного измерения нагрузки, а также малую жесткость нагружающей системы со стороны одного из блоков. Блоки представляют собой наклонные параллелепипеды, с наклоном около 70°, прижатие блоков осуществляется за счет внешнего поджима стягивающим приспособлением.

Исследованы режимы скольжения со срывом при увеличении нагрузки до критического (приводящего к срыву) и субкритического уровня, в разных условиях влажности зоны контакта блоков. Эксперименты проводились в две серии – с использованием одного трехкомпонентного датчика ускорений и с использованием измерителя ускорений, состоящего из нескольких датчиков с разными частотным и амплитудным диапазонами.

Для проведения экспериментов была разработана измерительная аппаратура, включающая формирователи сигналов и многоканальные регистраторы и способная непрерывно регистрировать высокочастотные сигналы, и программное обеспечение. Регистрировались следующие параметры: сдвиговое усилие, смещение блоков относительно неподвижной части установки, ускорения движения блоков, акустическая эмиссия. Проведено несколько нагружений на полный возможный ход смещения блоков друг относительно друга. В ходе каждого нагружения регистрировалось несколько эпизодов сильных быстрых подвижек. После проведения экспериментов измеренные данные были обработаны и проанализированы подробно.

В ходе серии с одним трехкомпонентным датчиком ускорений при субкритической нагрузке были обнаружены около 20 эпизодов движений («микросрывы»), которые по величине амплитуды ускорений на два порядка меньше, чем движения («большие срывы») при эпизодах традиционно наблюдаемого прерывистого скольжения. «Микросрывы» сопровождалась также очень малыми сбросом сдвигового усилия (порядка 1 Н), смещением (порядка 1 мкм) и акустической эмиссией. «Микросрывы» возникли после длительного увлажнения контакта, предположительно уже в процессе его высыхания.

Во второй серии экспериментов с комплексным измерителем ускорений удалось проверить данные по ускорениям при «больших срывах», которые достигали величины порядка первых сотен м/с². При этом наблюдалось движение обоих блоков навстречу друг другу.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИФЗ РАН.

EXPERIMENTS ON THE SLIDER MODEL OF FAULT: THE EFFECT OF HUMIDIFICATION OF THE FAULT ZONE ON THE PARAMETERS OF MODEL EARTHQUAKES

**P. A. Kaznacheev^{1,*}, Z.-Yu. Ya. Maibuk¹, A. V. Ponomarev¹, G. A. Sobolev¹, A. V. Patonin¹, V. V. Kokh¹,
D. V. Krayushkin^{1,2}, N. A. Zakrzhevskaya¹, I. N. Migunov¹**

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²National research university «HSU», Moscow, Russia

*Email: p_a_k@mail.ru

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ: МЕТОДИКА, АППАРАТНОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

П. А. Казначеев^{1,*}, А. В. Пономарев¹

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

*E-mail: p_a_k@mail.ru

В докладе представлен небольшой исторический обзор и современное состояние лабораторных экспериментальных исследований в ИФЗ РАН на моделях, воспроизводящих отдельные аспекты разрушения горных пород при сейсмическом процессе. Основное внимание сосредоточено на методике, аппаратном и программном обеспечении.

Описаны методика и аппаратура крупномасштабного эксперимента по деформированию и разрушению блоков горных пород метрового размера на 50-тонном прессе. Эксперимент проводился в 1980-х годах под методическим и организационным руководством ИФЗ РАН (Г. А. Соболев, А. В. Кольцов) с привлечением широкого круга смежных организаций и специалистов. Обозначены основные результаты, которые были достигнуты благодаря уникальным особенностям эксперимента и которые поддерживали основные идеи модели лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ), предложенной в ИФЗ РАН в 1971 г.

Описаны эксперименты на оригинальной модели сейсмического разлома (слайдер-модели), проведенные в 2010 г. Модель развивала концепцию М. Онаки сдвигового деформирования разлома, но использовала отличную от традиционной схему задания механических напряжений. Приведены результаты экспериментов по инициированию подвижки на разломе при внешнем воздействии.

В настоящее время продолжаются эксперименты на данной модели, возобновленные по инициативе Г. А. Соболева в 2022 г. Описана методика, аппаратное и программное обеспечение. Приведены некоторые результаты экспериментов.

Обсуждаются особенности измерительных систем, критичные при интерпретации результатов экспериментов. Каждая измерительная система, определяющая тот или иной физический параметр, сама по себе является динамической системой. Рассмотрены динамические особенности измерительных систем кинематических, силовых и акустикоэмиссионных величин. Показано, что неучёт этих особенностей может приводить к неверной или искаженной интерпретации регистрируемых данных. Отдельно обсуждаются эффективные алгоритмы оценки состояния модели в ходе эксперимента в режиме реального времени.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИФЗ РАН.

LABORATORY MODELING OF SEISMIC INSTABILITY: METHODOLOGY, EQUIPMENT AND SOFTWARE

P. A. Kaznacheev^{1,*}, A. V. Ponomarev¹

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: p_a_k@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОТИВОТОЧНОЙ КАПИЛЛЯРНОЙ ПРОПИТКИ НА ОСНОВЕ СЕТЕВОЙ (NETWORK) МОДЕЛИ

Кафи Ул Шаббир^{1,*}, О. Я. Извеков¹, А. В. Конюхов¹

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

*E-mail: kafiulshabbir@phystech.edu

В настоящее время влияние капиллярных сил на параметры многофазных течений в структурно неоднородных пористых средах является объектом интенсивных исследований, представляя большой интерес в задачах нефтяного инжиниринга, экологических и других приложениях.

Классические континуальные модели многофазной фильтрации неспособны объяснить неравновесные эффекты, связанные с быстрым изменением насыщенности или с конечным временем установления равновесной конфигурации флюидов в поровом пространстве. Задачи такого типа в континуальной постановке возникают при описании двухфазных течений в блочно-трещиноватой периодической пористой среде на основе моделей двойной пористости, полученных методами математической теории усреднения.

В настоящей работе реализована двумерная сетевая модель, в которой пористая среда представляется набором цилиндрических трубок (капилляров), пересекающихся в узлах (порах). Законы течения жидкостей в капиллярах сети с учетом капиллярных скачков давления на менисках совместно с условием согласования потоков в узлах приводят к системе линейных алгебраических уравнений для определения давления в узлах и скоростей перемещения менисков в капиллярах. Особенностью модели является неоднородность сети капилляров (трубки, составляющие сеть капилляров, имеют различный радиус). Также предложен оригинальный способ распределения потоков жидкостей в узлах сети: смачивающая жидкость направляется в более тонкие капилляры, обеспечивая минимум поверхностной энергии контакта флюидов и скелета.

С использованием предложенной модели решена задача противоточной пропитки низкопроницаемого блока смачивающей жидкостью. Низкопроницаемый блок пористой среды в начальный момент времени насыщен несмачивающей жидкостью, в то время как высокопроницаемый слой (моделируется большим радиусом капиллярных трубок) содержит смачивающую жидкость. Под действием капиллярных сил происходит пропитка блока смачивающей жидкостью.

Получена зависимость насыщенности низкопроницаемого включения от времени и среднее капиллярное давление после достижения равновесия. Результаты качественно соответствуют известным равновесным зависимостям капиллярного давления от насыщенности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №23-21-00175).

MODELING OF COUNTERCURRENT IMBIBITION USING A NETWORK MODEL

K. U. Shabbir^{1,*}, O. Y. Izvekov¹, A. V. Konyukhov¹

¹Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

*E-mail: kafiulshabbir@phystech.edu

МЕДЛЕННЫЕ ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ, КАК ТРИГГЕР СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, ПО ДАННЫМ ГНСС НАБЛЮДЕНИЙ

В. И. Кафтан¹, *

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: v.kaftan@gcras.ru

Станции непрерывных ГНСС наблюдений функционируют на территории Земли от первых лет до десятилетий. Особенно густые сети этих станций располагаются в сейсмоактивных районах Земли. Эти обстоятельства позволяют изучать поведение современных движений и деформаций земной коры перед сильными коровыми землетрясениями на более чем десятилетнем интервале. По результатам анализа временных рядов изменений координат ГНСС станций впервые обнаружены медленные деформационные волны полного сдвига, генерируемые сейсмическими событиями и провоцирующие сильные землетрясения. Основным инструментом обнаружения деформационных волн явились кинематические визуализации сейсмо-деформационного процесса на фоне региональной тектонической обстановки. Такие визуализации позволяют исследователю отследить пространственно-временную эволюцию деформаций земной коры в связи с возникновением землетрясений и расположением тектонических структур. Первым случаем регистрации квазилинейной деформационной волны явилось исследование эволюции сейсмо-деформационного процесса перед сильным землетрясением Напа (август 2014 г., $M = 6.0$). Вторым событием, где проявилась деформационная волна концентрической формы, является землетрясение Риджкрест (июль 2019 г., $M = 7.1$). В этих случаях медленные волны явились триггерами сильных землетрясений. В сейсмоактивном районе Паркфилд в межсейсмический период также обнаружена деформационная волна линейной формы, распространяющаяся вдоль разломной зоны Сан-Андреас с северо-востока на юго-запад. Скорости перемещения волновых фронтов составили 20, 7 и 2 км в год, соответственно. Критические величины деформации, послужившей триггером, составляют первые единицы 10^{-6} . Все упомянутые явления относятся к территории США, Калифорния. Изучение эволюции деформации полного сдвига на территории Новой Зеландии с 2010 по 2016 гг. в связи с совокупностью сильных землетрясений $M = 6.1–7.8$ позволило предположить, что серии сильнейших землетрясений могут быть взаимосвязаны длительным во времени единым деформационным процессом, начало которого обусловлено образованием аномальной деформации полного сдвига. Процесс миграции деформации в данном случае довольно сложен, что, по-видимому, связано со сложностью сейсмического процесса и региональной тектоники – области тройного сочленения главных тектонических элементов. В исследовании эволюции горизонтальной деформации в связи с землетрясением Ван (октябрь 2011 г., $M = 7.2$) обнаружено приближение аномалии полного сдвига к будущему эпицентру события одновременно с двух сторон, с запада, из зоны разломов Варто, и с юга, от шовной зоны Битлис-Загрос. Эти волны деформации величиной $\sim 10^{-6}$ сомкнулись в эпицентральной зоне землетрясения Ван в момент главного события. Скорость распространения волн составляет ~ 100 км в год. Последовательность землетрясений $M = 6.1–7.8$ в зоне Восточно-Анатолийского разлома (Турция) продемонстрировала эффект миграции сильных событий с северо-востока на юго-запад. В этом же направлении распространялся фронт деформации полного сдвига $\sim 10^{-6}$ со средней скоростью ~ 25 км в год, вплоть до серии печально известных событий Караманмараш (февраль 2023 г.). Упомянутые эпизоды развития сейсмодеформационного процесса относятся к зонам сейсмоактивных разломов с механизмом смещения по простиранью. Аномальные сдвиговые деформации на западных территориях Японского архипелага перед землетрясениями Кумамото (апрель 2026 г., $M = 6.5–7.3$), Нагано (ноябрь 2014 г., $M = 6.8$) и Ното (январь 2024 г., $M = 7.6$) не проявились.

SLOW DEFORMATION WAVES AS A TRIGGER FOR STRONG EARTHQUAKES, ACCORDING TO GNSS OBSERVATIONS

V. I. Kaftan¹, *

¹Geophysical center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: v.kaftan@gcras.ru

ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ПОДХОД К МОНИТОРИНГУ НАВЕДЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ ОТ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ СОБЫТИЙ

И. О. Китов¹, И. А. Санина¹, *

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: iasanina51@gmail.com

На примере событий, произошедших на полигоне Пунгери (КНДР), и землетрясения вблизи г. Мариуполь в 2016 г. рассмотрена эффективность использования метода кросс корреляции волновых форм (ККВФ) для мониторинга наведенной сейсмичности. Для обнаружения и относительной локализации слабых сейсмических событий в пределах полигона Пунгери использовался мульти-мастер метод, основанный на одновременном обнаружении сигналов с помощью шаблонных волновых форм от 29 мастер событий (6 взрывов и 23 афтершоков пятого и шестого испытаний), зарегистрированных на групповых станциях Международной системы мониторинга (МСМ) KSRS и USRK. Прототип мульти-мастер метода был разработан совместно сотрудниками Международного центра данных и Института динамики геосфер (ИДГ) РАН. После тестирования и настройки метод был использован для ретроактивной обработки данных с 2009 г. до середины 2021 г., а также для обработки данных в реальном времени с июля 2021 г. Всего было обнаружено около 200 событий, начиная с афтершоков третьего испытания, проведенного 12 февраля 2013 г. Ни одного сейсмического события, аналогичного афтершокам подземных взрывов в КНДР, не было обнаружено между 2009 г. и февралем 2013 г., что свидетельствует в пользу связи наблюдаемых с 2013 г. сейсмических событий и взрывной активности на полигоне. В целом, развитие афтершоковой последовательности на начальном этапе не противоречило закону Омори, если принять во внимание возможность взаимодействия колонн обрушения пятого и шестого взрывов, находившихся в пределах 1–2 км друг от друга. Однако ожидаемого спада и практического прекращения сейсмической активности в 2021 и 2022 гг. не произошло, а в 2023 году частота и магнитуда, наблюдаемых на полигоне сейсмических событий, только возросла. Эта тенденция продолжилась в 2024 г. Так, 27 марта 2024 г. в один день наблюдалось восемь событий, причем пять из них имели достаточно высокую магнитуду для обнаружения на трех и более сейсмических станциях. При этом для событий, наблюдаемых в 2022–2024 гг., механизм связи с процессами изменения напряженно-деформированного состояния среды после воздействия мощных взрывов трудно объяснить с помощью простых моделей релаксации массива.

Землетрясение вблизи г. Мариуполь, произошедшее 7 августа 2016 г., имело магнитуду m_b от 4.5 до 4.9 по данным разных сейсмологических центров. Используя непрерывные сейсмические записи двух станций группирования ИДГ РАН, а также две групповые (AKASG и BRTR) и одну трехкомпонентную (KBZ) станции МСМ, удалось обнаружить 12 афтершоков, произошедших в течение 5 суток после землетрясения. В качестве шаблонных были использованы сигналы от главного события. Для увеличения отношения сигнал/шум и определения точного времени вступления регулярных сейсмических волн от афтершоков нами были использованы шаблоны разной длительности – от 10 до 180 с в зависимости от расстояния до станции и типа волны, а также полосовая фильтрация в узких частотных диапазонах. Самые высокие чувствительность детектора и точность оценки времени вступления волны P были достигнуты при использовании шаблонного сигнала, включающего все регулярные волны от P до L_g .

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122040400015-5).

ADVANCED MONITORING FOR NATURAL AND INDUCED SEISMIC SEQUENCES

I. O. Kitov¹, I. A. Sanina¹, *

¹Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: iasanina51@gmail.com

СВЕРХСДВИГОВЫЙ РЕЖИМ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАЗРЫВА

С. Б. Кишкина^{1,*}, А. М. Будков¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: KishkinaS@idgras.ru

Сверхсдвиговым называют режим распространения разрыва при землетрясении, когда скорость распространения разрыва выше скорости создаваемых сейсмических сдвиговых волн.

В последние десятилетия интерес к изучению таких событий в научной литературе заметно вырос, поскольку наряду с косвенными доказательствами существования подобных сценариев, которые были основаны на анализе сейсмических данных, в мире все чаще получают и прямые данные движения грунта в ближнем поле, подтверждающие, что землетрясение достигло сверхсдвиговой скорости. По сравнению с «обычным» землетрясением сверхсдвиговые («быстрые» или «сверхскоростные») разрывы вызывают сильные сотрясения гораздо дальше от источника события. Так что задача описания старта и процесса распространения разрыва не только несет в себе фундаментальные смыслы для понимания механики землетрясения, но имеет и весьма выраженное прикладное значение для инженерной сейсмологии.

На основе результатов проведенного численного моделирования удалось рассмотреть некоторые закономерности формирования сверхсдвигового разрыва. Эксперименты проводились для однородной и гетерогенной поверхности численного модельного разлома с опорой на известную модель асперити. Неоднородность поверхности задавалась конфигурацией фрикционных пятен, разупрочняющихся при сдвиге; между пятнами предполагалось расположение участков со стабильным трением.

Необходимым условием трансформации разрыва в сверхсдвиговый режим является быстрое фрикционное разупрочнение. При этом чем ниже величина остаточной фрикционной прочности разлома по сравнению с пиковым значением, тем при более низком уровне средних напряжений может произойти переход к сверхсдвиговому разрыву.

Расчеты подтвердили существование двух различных механизмов перехода скольжения по разлому в сверхсдвиговый режим. Скорость разрыва или плавно и непрерывно проходит через диапазон между скоростью Рэлея и скоростью сдвиговой волны, или инициируется дочерний разрыв. Во втором случае материнский разрыв продолжает распространяться со скоростью ниже Рэлеевской и, в итоге, сливается с дочерним разрывом, скорость которого превышает диапазон скоростей рэлеевской волны до скорости сдвиговой волны.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 22-17-00204).

UPERSHEAR REGIME OF RUPTURE PROPAGATION

S. B. Kishkina^{1,*}, A. M. Budkov¹

¹Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: KishkinaS@idgras.ru

ВРЕМЕННЫЕ ЗАДЕРЖКИ РЕАКЦИИ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ НА СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ РАЗЛИЧНОГО КЛАССА

Е. Н. Козакова¹*, И. А. Ряховский¹, С. З. Беккер¹, Ю. В. Поклад¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*Email: katyam98@yandex.ru

Электромагнитное излучение сверхдлинного волнового диапазона (СДВ, 3–30 кГц) является наиболее эффективным инструментом для исследования состояния и динамики нижней ионосферы во время различных гелиогеофизических возмущений (солнечные вспышки, магнитные бури, высыпания заряженных частиц, прохождение утреннего и вечернего терминатора). Для исследования процессов, происходящих в нижней ионосфере, в Геофизической обсерватории «Михнево» ИДГ РАН с 2014 г. ведется непрерывная регистрация вариаций амплитудно-фазовых характеристик сигналов ряда СДВ передатчиков, расположенных по всему миру [1].

Наличие большого объема экспериментальных данных по вариациям параметров СДВ-сигналов позволило нам существенно продвинуться в исследовании ионизационно-рекомбинационных процессов, происходящих в нижней ионосфере во время солнечных вспышек различного класса [2, 3]. Данная работа посвящена статистическому анализу временных задержек отклика нижней ионосферы на солнечные вспышки C-, M- и X-класса. Для 212 солнечных вспышек были проанализированы вариации амплитуды и фазы сигналов от станций GQD, GBZ, NAA, DHO, ICV и рассчитаны значения задержки экстремумов амплитудно-фазовых характеристик относительно максимума потоков рентгеновского излучения (GOES). В результате проведенного анализа были построены распределения временных задержек от классов вспышек. Полученные результаты в дальнейшем можно будет использовать для оценки коэффициентов ионизации и рекомбинации нижней ионосферы.

Литература

1. Ryakhovskiy I.A., Gavrilov B.G., Poklad Yu.V., Bekker S.Z., Ermak V.M. The State and Dynamics of the Ionosphere from Synchronous Records of ULF/VLF and HF/VHF Radio Signals at Geophysical Observatory «Mikhnevo» // *Izvestiya Physics of the Solid Earth*. 2021. Vol. 57 (5). P. 718–730. <https://doi.org/10.1134/S1069351321050177>
2. Ryakhovskiy I.A., Poklad Yu.V., Gavrilov B.G. Estimate of Lower Ionosphere Ionization during Solar Flares of the X Class According to VLF Observations // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2023. Vol. 63 (4). P. 377–383.
3. Ряховский И.А., Поклад Ю.В., Гаврилов Б.Г. Верификация эмпирической модели ионизации нижней ионосферы во время солнечных вспышек различного класса // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2024. Том 64. № 4.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900175-6).

THE RESPONSE TIME DELAYS OF THE LOWER IONOSPHERE TO VARIOUS CLASSES SOLAR FLARES

E. N. Kozakova¹*, I. A. Ryakhovskiy¹, S. Z. Bekker¹, Y. V. Poklad¹

¹Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: katyam98@yandex.ru

КОЛЬЦЕВАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ НА ГЛУБИНАХ ДО 110 КМ ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ И СИЛЬНЕЙШИМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ В ТИХООКЕАНСКИХ ЗОНАХ СУБДУКЦИИ: ПРОГНОЗ МЕСТА И МАГНИТУДЫ ВОЗМОЖНОГО СОБЫТИЯ В РАЙОНЕ КАМЧАТКИ

Ю. Ф. Копничев¹, И. Н. Соколова², *

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

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Москва, Россия

*E-mail: sokolova.inessa@mail.ru

Рассматриваются элементы сейсмичности на глубинах до 110 км, проявляющейся перед землетрясениями с $M_w = 7.0$ – 9.0 на западе и востоке Тихого океана. Выявлены кольцевые структуры сейсмичности в трех диапазонах глубин: 0–33, 34–70 и 71–110 км, которые сформировались в течение нескольких десятков лет перед 38 сильными и сильнейшими землетрясениями с гипоцентрами на глубинах 10–40 и 42–110 км. Структуры формируются событиями с магнитудами, величины которых не ниже пороговых (соответственно M_{p1} , M_{p2} и M_{p3}). Установлены существенные различия средних параметров M_{p2} – M_{p3} и M_{p1} – M_{p3} для неглубоких и глубоких сильных землетрясений на западе и востоке Тихого океана. На примере Чигникского землетрясения 2021 г. ($M_w = 8.2$) в районе Юго-Западной Аляски продемонстрирована возможность успешного прогноза места и магнитуды сильнейшего события по характеристикам кольцевых структур. Оценены возможности прогнозирования глубин готовящихся сильных событий по характеристикам кольцевых структур [1].

Рассмотрены характеристики кольцевой сейсмичности в районе Камчатки. В области между 52° и 54° N, где не было достаточно сильных событий около 65 лет, выделены кольца сейсмичности в трех диапазонах глубин. Литосфера этого района характеризуется аномально высоким поглощением короткопериодных поперечных волн. Используя полученные ранее зависимости параметров M_{p1} и M_{p2} от магнитуд M_w землетрясений для запада Тихого океана, мы оценили магнитуду возможного здесь сильного события: $M_w = 8.6 \pm 0.2$. Кроме того, на основании анализа параметров трех кольцевых структур сделан вывод о глубине гипоцентра готовящегося сильного землетрясения: $h \leq 40$ км.

Обсуждаются причины формирования колец сейсмичности, их связь с дегидратацией материала погружающихся плит и миграцией глубинных флюидов.

Литература

1. Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Характеристики кольцевой сейсмичности на глубинах до 110 км перед сильными и сильнейшими землетрясениями в тихоокеанских зонах субдукции // Российский сейсмологический журнал. 2023. Т. 5. № 4. С. 41–51. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.4.03>. EDN: HDHWNE

RING-SHAPED SEISMICITY AT DEPTH UP TO 110 KM PRIOR TO LARGE AND GREAT EARTHQUAKES IN THE PACIFIC SUBDUCTION ZONES: FORECAST OF PLACE AND MAGNITUDE OF THE POSSIBLE EVENT IN KAMCHATKA REGION

Y. F. Kopnichev¹, I. N. Sokolova², *

¹Schmidt institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Obninsk, Russia

*E-mail: sokolova.inessa@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОСВЯЗИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ

В. М. Костин¹, *, О. Я. Овчаренко¹, Е. П. Трушкина¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН имени Н. В. Пушкова Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: kostin.vm44@gmail.com

В рамках исследования взаимосвязи землетрясений и тропических циклонов (ТЦ) [1] на большом статистическом материале было показано, что триггерами многих литосферных землетрясений могут являться ТЦ. Также триггерами интенсификации тропических возмущений и вторичного усиления ослабленных ТЦ могут являться землетрясения $M_w > 4.5$ на удалении до 3000 км от ТЦ. С 2023 г. проводится мониторинг землетрясений $M_w > 5.7$ и ТЦ [2] и для них в области радиусом 100 км анализируются совместные карты ТЦ и землетрясений, произошедшие с 2000 г. По данным американского NCON и немецкого GFS метеопрогнозов развития ТЦ с глубиной до 5 дней можно прогнозировать сильные землетрясения. Фрагменты таких прогнозов были представлены на даты конференций ИЗМИРАН, ИТПЗ РАН, ИКИ РАН, MedGU 2023 г. и приведены в презентациях [3]. Достоверность прогнозов превышала 50%. Такой прогноз нарушался в случаях, когда происходили резкие изменения траекторий движения ТЦ (не предсказанные метеопрогнозами), «одновременно» зарождались ТЦ и землетрясения и если землетрясения происходили без ТЦ. В частности, к категории таких событий можно отнести землетрясение $M = 7.8$ в Турции 06.02.2023 г. Эти случаи рассматриваются как события, подтверждающие гипотезу ученых МФТИ и ИЯИ РАН о воздействии бозе-астероидов темной материи на литосферные плиты [4, 5], а также их воздействие на атмосферу Земли, что проявляется в усилении тропических возмущений. Будет дан прогноз сильных землетрясений на дни 7-й Международной конференции «Триггерные эффекты в геосистемах».

Литература

1. Костин В.М., Беляев Г.Г., Овчаренко О.Я., Трушкина Е.П. Особенности взаимосвязи тропических циклонов и землетрясений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 125–139. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-1-125-139>
2. Костин В.М., Овчаренко О.Я., Трушкина Е.П. Особенности воздействия тропических циклонов на литосферные плиты в суперлуние 2023 г. Краткосрочный прогноз сильных землетрясений: Симпозиум «Физические основы прогнозирования гелиогеофизических процессов и событий» (Прогноз-2023). Сборник тезисов. ИЗМИРАН. 2023. С. 52–53.
3. Костин В.М., Беляев Г.Г., Овчаренко О.Я., Трушкина Е.П. Прогноз сильных землетрясений по данным развития тропических циклонов: Материалы 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» / Электронный сборник материалов конференции. Москва. ИКИ РАН. 2023. С. 350. <https://doi.org/10.21046/21DZZconf-2023a>
4. https://weekend.rambler.ru/read/52240610/?utm_content=weekend_media&utm_medium=read_more&utm_source=copylink
5. Levkov D.G., Panin A.G., Tkachev I.I. Gravitational Bose-Einstein condensation in the kinetic regime // arXiv: 1804.05857v2 [astro-ph.CO] 20 Sep 2018. INR-TH-2018-005.

FEATURES OF THE RELATIONSHIP BETWEEN EARTHQUAKES AND TROPICAL CYCLONES

V. M. Kostin¹, *, O. Y. Ovcharenko¹, E. P. Trushkina¹

¹Federal State Budgetary Institution of Science N.V. Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: kostin.vm44@gmail.com

О ПЕРЕХОДЕ СЫПУЧЕЙ СРЕДЫ В ПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МНОГОКРАТНЫХ СЛАБЫХ УДАРОВ

В. П. Косых^{1, *}, О. А. Микенина¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

*E-mail: v-kosykh@yandex.ru

Слабые удары, действующие на раздробленные геоматериалы длительное время, приводят к постепенному накоплению изменений в их структуре. В сыпучих материалах могут происходить повороты частиц, меняться координационное число, плотность упаковки и т.п. При определенных условиях слабые воздействия могут приводить к потере несущей способности материала. В настоящей работе экспериментально и численно исследовано влияние многократных слабых ударов на устойчивость тяжелой колонны, установленной на песчаном массиве и нагруженной до предельным опрокидывающим моментом.

Исследования проводились на стенде, представляющем собой камеру, выполненную в виде прямоугольного параллелепипеда. Стенки камеры изготовлены из древесины, толщиной 16 мм. Размеры камеры (размеры образца сыпучего) составляли: длина 500, ширина 150, высота 250 мм. В первой серии опытов камера полностью заполнялась кварцевым песком с размером частиц 0.3–0.5 мм. На поверхность образца на расстоянии 340 мм от передней стенки устанавливалась цилиндрическая колонна с диаметром основания 70 мм и массой 3 кг. Затем колонна нагружалась статическим опрокидывающим моментом и определялось его предельное значение. После этого образец формировался заново и вновь определялся предельный момент. Было установлено, что его значения, полученные в ряде опытов, отличаются от средней величины не более чем на 5%. Данная средняя величина была принята за характерный масштаб – предельный статический момент.

Во второй серии опытов колонна нагружалась моментом, составляющим 0.6 предельного статического момента. Затем по упругой пластине, закрепленной на внутренней стороне передней стенки камеры, через отверстие наносились слабые удары энергией 0.01 Дж с частотой 1 Гц. В ходе экспериментов записывалась зависимость угла наклона колонны от числа ударов.

Было установлено, что с увеличением числа ударов колонна постепенно наклоняется и на диаграмме угла поворота наблюдается ряд микроскачков. Материал под основанием колонны переходит в предельное состояние. В нем возникает поверхность скольжения и происходит опрокидывание колонны. Число ударов, которое приводит к падению колонны, может отличаться от опыта к опыту более чем в 100 раз – от 2000 до 200000 ударов.

Методом дискретных элементов проведен численный эксперимент, в котором реализован описанный способ нагружения. Получено качественное соответствие результатов экспериментальных данных и численных расчетов. Расчеты проводились с использованием программы Altair EDEM™.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФНИ (проект № 121052500138-4).

ON THE MEDIUM TRANSITION TO THE LIMITING STATE OF GRANULAR MATERIAL UNDER THE INFLUENCE OF PERIODICAL WEAK IMPACTS

V. P. Kosykh^{1, *}, O. A. Mikenina¹

¹Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk, Russia

*E-mail: v-kosykh@yandex.ru

ИЗЛУЧЕНИЕ КНЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ИОНОСФЕРНЫМ КОЛЬЦЕВЫМ ИСТОЧНИКОМ

Д. С. Котик¹, О. Ю. Журавлева^{2, *}, Е. В. Орлова², В. А. Яшнов²

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский радиофизический институт», Нижний Новгород, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского», Нижний Новгород, Россия

*E-mail: zuravleva98@yandex.ru

В экспериментах, проведённых на нагревных стендах «Сура» [1] и «HAARP» [2], показано, что при воздействии на ионосферу мощным модулированным КВ радиоизлучением в области F возникает искусственный ионосферный источник (ИИИ) электромагнитных волн КНЧ и СНЧ диапазонов. Результаты расчётов параметров такого источника приведены в работе [3].

В данной работе предложена модифицированная аналитическая модель пространственного распределения плотности тока в ИИИ, с использованием которой проведены расчёты электромагнитных полей источника вблизи земной поверхности и в ионосфере. Предполагается, что источник представляет собой распределённый горизонтальный кольцевой ток, параметрами которого являются сила тока, средний радиус и характерный вертикальный размер. Модель ионосферы выбрана в виде четырёхслойной магнитоактивной плазмы: область E, «долина», область F и внешняя ионосфера. Каждый из указанных слоёв предполагается однородным. Для описания плазмы внутри каждого из слоёв используются модели ионосферы IRI-2016, атмосферы NRLMSISE-00 и геомагнитного поля IGRF-12. Плазма предполагается многокомпонентной, учитывается наличие электронов и нескольких сортов ионов, а также соударения между частицами [4].

Получено строгое решение задачи в интегральной форме, основанное на представлении электромагнитных полей источников, приведённых в [5]. Проведены расчёты магнитного поля источника вблизи земной поверхности. Исследована зависимость поля от расстояния и частоты при различных параметрах источника.

Литература

1. Котик Д.С., Рябов А.В., Ермакова Е.Н. и др. Обнаружение сигналов в диапазоне (2–20) Гц, возбуждаемых в верхней ионосфере КВ излучением стенда «Сура»: Труды XXIII Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн». Изд. МарГТУ. 2011. Т. 1. С. 156–159.
2. Eliasson B., Chang C.-L., Papadopoulos K.J. Generation of ELF and ULF electromagnetic waves by modulated heating of the ionospheric F2 region // Geophys. Res. 2012. Vol. 117 P. A10320. <https://doi.org/10.1029/2012JA017935>
3. Рябов А.В., Котик Д.С. Генерация УНЧ-пульсаций в ионосфере при воздействии на неё мощным КВ-радиоизлучением // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2012. Т. 3 (1). С. 65–70.
4. Котик Д.С., Рябов А.В., Яшнов В.А., Орлова Е.В. Распространение крайне низкочастотного излучения от искусственного ионосферного источника в трёхмерном неоднородном магнитогидродинамическом волноводе // Изв. вузов. Радиофизика. 2021. Т. 64. № 1. С. 1–11.
5. Kondrat'ev I.G., Kudrin A.V., Zaboronkova T.M. Electrodynamics of density ducts in magnetized plasma. Gordon and Breach Science Publishers. 1999. – 278 p.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (№ Н-029-О_2023-2025, мнемокод проекта № FSWR-2023-0031).

RADIATION OF ULF/ELF ELECTROMAGNETIC WAVES BY IONOSPHERIC RING SOURCE

D. S. Kotik¹, O. Y. Zhuravleva^{2, *}, E. V. Orlova², V. A. Yashnov²

¹Radiophysical Research Institute, Nizhny Novgorod, Russia

National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

*E-mail: zuravleva98@yandex.ru

О РОЛИ ФЛЮИДОВ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ СЕЙСМИЧЕСКОГО ЦИКЛА

Г. Г. Кочарян¹, *

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: gevorgkidg@mail.ru

Связь флюидов с режимом деформирования разломных зон на основе закона изменения эффективных напряжений подразумевалась, начиная с ранних попыток построения моделей очага землетрясения. В классической формулировке закона Терцаги предполагается, что напряжения и поровое давление независимы, однако ясно, что они могут быть связаны через процесс деформирования среды. Из-за изменения пустотности материала в процессе деформирования (дилатансия/компрессия) происходит изменение (соответственно снижение/увеличение) порового давления.

Вторым аспектом являются механо-химические эффекты, изменяющие параметры фрикционного взаимодействия, прочность материала и скорость роста микротрещин. В лабораторных экспериментах внедрение воды в образец без существенного увеличения порового давления часто вызывает активизацию процесса разрушения [2] или кардинальное изменение режима скольжения [1].

В литературе распространено ошибочное мнение о том, что основная роль флюида – разупрочнение материала-заполнителя зоны скольжения. Хотя для многих геоматериалов действительно характерно снижение фрикционной прочности при насыщении флюидом, этот эффект обычно не наблюдается у глинки трения из прочных кварцесодержащих пород, тогда как зарождение динамического скольжения происходит именно на участках, сложенных такими породами.

Важно разграничить влияние флюидов на разных стадиях сейсмического цикла. На стадии формирования зоны влияния разлома, по-видимому, происходят процессы, описываемые ДД моделью – снижение порового давления из-за роста пустотности, заполнение образовавшихся трещин водой и постепенное повышение давления. При многократно повторяющихся подвижках по сейсмогенному разлому роль этого механизма, судя по результатам расчетов, ограничена. Существует целый ряд механизмов, которые могут способствовать увеличению порового давления в межсейсмический период на сейсмогенных глубинах – высвобождение флюидов в результате реакции дегидратации и охлаждения магмы, подъем образовавшегося флюида к поверхности из-за низкой плотности и т.д. Одновременно с этим, закрытие пор и трещин при уплотнении породы снижает проницаемость, препятствуя выходу жидкости и увеличивая поровое давление.

Влияние динамического сдвига по разлому на нарушенность массива оказывается не столь сильным, как предполагается в некоторых моделях развития разрыва, согласно которым проницаемость разломной зоны увеличивается на много порядков [3]. Предположения о радикальном увеличении проницаемости разломной зоны в ходе распространения динамического разрыва, основаны на представлениях об образовании открытых трещин в окрестности разрыва, которые со временем залечиваются. Такие трещины могут образоваться в результате разрушения отрывом. На небольших глубинах этот эффект может быть существенным, однако на сейсмогенных глубинах, как показывают результаты расчетов, он в значительной степени подавляется литостатическим давлением.

На наш взгляд, образование таких высокопроводящих каналов представляется крайне маловероятным событием, тем более, что при глубинном бурении через зоны сейсмогенных разломов ни в одном случае не было обнаружено крупных высокопроницаемых трещин.

Значительные градиенты порового давления в разломных зонах могут быть вызваны сейсмическими волнами в результате разрушения низкопроницаемых коллоидных барьеров в трещинах внутри зоны влияния разлома. При определенных соотношениях таких параметров, как жесткость разломной зоны, частота и амплитуда сейсмической волны, такой механизм может оказаться весьма эффективным из-за возникновения медленных волн Био.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 22-17-00204).

Литература

1. Кочарян Г.Г., Шатунов И.В. Актуальные вопросы гидрогеологии сейсмогенных разломных зон // Физика Земли. 2024. № 4. С. 3–32.
2. Смирнов В.Б., Пономарев А.В. Физика переходных режимов сейсмичности. М. : РАН. 2020. – 412 с.
3. Marguin V., Simpson G. Influence of fluids on earthquakes based on numerical modeling // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2023. 128. P. e2022JB025132. <https://doi.org/10.1029/2022JB025132>

ON THE ROLE OF FLUIDS AT DIFFERENT STAGES OF THE SEISMIC CYCLE

G. G. Kocharyan^{1, *}

¹*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**E-mail: gevorgkidg@mail.ru*

ИЗМЕРИТЕЛЬ УСКОРЕНИЙ ДЛЯ ЛАБОРАТОРНОЙ МОДЕЛИ РАЗЛОМА

Д. В. Краюшкин^{1,2,*}, П. А. Казначеев¹, З.-Ю. Я. Майбук¹, А. В. Пономарев¹

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

²Национальный исследовательский университет «ВШЭ» (НИУ ВШЭ), Москва, Россия

*E-mail: KrayushkinDenV@yandex.ru

Моделирование геодинамических процессов требует учета масштабных факторов. Модели разломных зон, которые можно построить в лаборатории, не превышают по размерам первых метров. При этом и в натурных, и в модельных исследованиях применяются акселерометры, которые различаются прежде всего частотным диапазоном [1]. В модельных исследованиях требуется переход на более высокие частоты измерения ускорений. Предыдущие эксперименты с лабораторной слайдер-моделью разлома показали, что один аналоговый пьезоэлектрический датчик не позволяет отследить все возникающие движения, включая движения типа стик-слип, низкочастотных землетрясений и асейсмического крипа [2].

Целью настоящей работы было создать измеритель ускорений, который состоит из нескольких акселерометрических датчиков, отличающихся рабочими амплитудным и частотным диапазонами. Комплексирование датчиков позволяет расширить амплитудный и частотный диапазоны измерений ускорений по сравнению с каждым датчиком по отдельности. Разработанное устройство измерения ускорений состоит из двух аналоговых акселерометров и двух цифровых. Цифровые акселерометры представлены малоамплитудным LIS331DLH (± 8 g) и высокоамплитудным H3LIS331DL (± 400 g), аналоговые – высокоамплитудными BC111 и ДН-4-М1. Был разработан макет измерителя, учитывающий проблемы помехозащищенности. Основным узлом, который управляет, запрашивает, получает, нормирует данные с цифровых датчиков, является микроконтроллер STM32F303VST6. Для единообразия регистрируемых данных и отладки измерителя было принято решение преобразовывать цифровой сигнал в аналоговый при помощи выхода ЦАП микроконтроллера. При этом задержка между получением сигнала и его выводом в аналоговой форме была сделана фиксированной и минимально возможной. Преобразование сигнала с аналоговых датчиков осуществлялось с помощью усилителя ZETLAB H440, который позволяет выбрать тип выходного сигнала аналогового датчика между напряжением, напряжением по стандарту ICP-IEPE (со встроенным усилением) и зарядовым выходом. Для исследования работы прототипа измерителя ускорения были проведены эксперименты по ударному воздействию различного характера, имитирующие сильные и быстрые движения, а также опробована работа измерителя на слайдер-модели разлома по [2]. Результаты показали работоспособность устройства и целесообразность его использования в лабораторных экспериментах.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИФЗ АН.

Литература

1. Кочарян Г.Г., Остапчук А.А., Павлов Д.В., Гридин Г.А., Морозова К.Г., Hongwen J., Пантелеев И.А. Лабораторные исследования закономерностей фрикционного взаимодействия блоков скальной породы метрового масштаба. Методика и первые результаты // Физика Земли. 2022. № 6. С. 162–174.

2. Казначеев П.А., Майбук З.-Ю.Я., Пономарев А.В., Соболев Г.А., Кох В.В., Краюшкин Д.В. Оценка энергии подвижки в экспериментах типа стик-слип : Тезисы докладов по материалам VI Международной конференции «Триггерные эффекты в геосистемах» (21–24 июня 2022 г., Москва). М. : ИДГ РАН, 2022. С. 181.

ACCELEROMETER FOR LABORATORY MODEL OF FAULT

D. V. Krayushkin^{1,2,*}, P. A. Kaznacheev¹, Z.-Y. Y. Maibuk¹, A. V. Ponomarev¹

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²National research university «HSU», Moscow, Russia

*E-mail: KrayushkinDenV@yandex.ru

АНОМАЛЬНЫЕ ПОДНЯТИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, ИНДУЦИРОВАННЫЕ РАЗРАБОТКОЙ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА

Д. К. Кузьмин¹, *

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

**Email: dimak1292@mail.ru*

В 2009 г. на одном из газовых месторождений Республики Казахстан была создана система наблюдений с профилями и пунктами, которая по возможности учитывает основные структурно-геологические и промыслово-геологические особенности территории месторождения и смежных участков. Всего на территории месторождения в 2009 г. было заложено 120 нивелирных пунктов на 4 профилях общей протяженностью 61.8 погонных км и 30 GPS-пунктов. Комплексный анализ результатов наблюдений на геодинамическом полигоне показал наличие систематического поднятия земной поверхности в центральной части территории месторождения, индуцированного разработкой продуктивных пластов. Сопоставительный анализ результатов наблюдений был согласован с аналитическим модельным расчетом вертикальных смещений на полигоне. Моделирование поднятия земной поверхности проводилось на основе известных геологических данных, петрофизических характеристик пород, а также данных об изменении пластового давления. Аналитическая модель деформируемого пласта позволила смоделировать поднятие земной поверхности по площади всего месторождения, а также сопоставить модельные расчеты с наблюдаемыми вертикальными смещениями, полученными по результатам геодинамического мониторинга. Результаты моделирования показали, что максимум поднятия несколько смещен к северу, что соответствует пространственной конфигурации профилей. Это подчеркивает взаимосогласованность результатов моделирования с наблюдаемыми данными. На основе модели деформируемого пласта также рассчитаны градиенты смещений земной поверхности, а именно наклоны и относительные горизонтальные деформации. На основе полученных расчетов, дана оценка геодинамической опасности в зоне поднятия земной поверхности. Комплексный анализ данных геодезического мониторинга и моделирования дает возможность оценивать геодинамические риски как на локальных участках, так и по площади всего месторождения.

ANOMALOUS UPLIFTS OF THE EARTH'S SURFACE INDUCED BY THE DEVELOPMENT OF OIL AND GAS FIELDS

D. K. Kuzmin¹, *

¹*Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**E-mail: dimak1292@mail.ru*

ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ОПАСНОСТЬ ИНДУЦИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Ю. О. Кузьмин^{1, *}

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

*E-mail: kuzmin@ifz.ru

Рассмотрены примеры индуцированных деформационных и сейсмических процессов на разрабатываемых месторождениях нефти и газа. Приведены случаи проявления техногенных и техногенно-индуцированных деформационных процессов: обширные просадки земной поверхности и деформационная активизация разломных зон.

Представлены примеры возникновения техногенных и техногенно-индуцированных землетрясений. Показано, что наиболее опасными геодинамическими явлениями, которые возникают при разработке месторождений нефти и газа являются техногенно-индуцированные деформации разломных зон и техногенно-индуцированные сейсмические события.

Обзор зарегистрированных обширных просадок земной поверхности на месторождениях нефти и газа показал, что наибольшие амплитуды (более 1 м) оседаний, накопленные за весь период разработки, отмечаются для нефтяных месторождений. Это парадоксальный факт, поскольку на этих месторождениях происходит периодическая закачка жидкости в пласт, что существенно снижает итоговую амплитуду оседаний. Сделан вывод о том, что происходит разрушение пород-коллекторов, которые создают необратимые деформации. Именно таким образом сформировались широко известные многометровые просадки на ряде нефтяных месторождений.

Достоверно установлено, что сейсмические события, напрямую обусловленные разработкой месторождений, имеют слабый сейсмический эффект, а их глубина сосредоточена в окрестности разрабатываемого резервуара. Техногенно-индуцированные землетрясения имеют намного большие магнитуды, а очаги расположены глубже, чем резервуар. Этот тип землетрясений встречается в районах с высокой и умеренной сейсмической активностью.

Техногенно-индуцированные деформации разломных зон происходят повсеместно. Автору не удалось обнаружить ни одного месторождения с развитой системой геодинамического мониторинга, где эти процессы отсутствовали бы. Техногенно-индуцированные деформации разломных зон часто сопровождаются аварийными ситуациями на объектах инфраструктуры месторождений.

GEODYNAMIC HAZARD OF INDUCED PROCESSES DURING THE DEVELOPMENT OF OIL AND GAS FIELDS

Y. O. Kuzmin^{1, *}

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: kuzmin@ifz.ru

АНОМАЛЬНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ КРАТЕРА ЖАМАНШИН: АНАЛИЗ С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

М. Ю. Кузьмичева^{1, *}, Б. А. Иванов¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: mukuzmgm@gmail.com

Катастрофический удар астероида о земную поверхность запускает целый ряд процессов в геосферах на разных временных масштабах, одним из процессов является образование ударного кратера. Аномальное магнитное поле (АМП) ударного метеоритного кратера, то есть аномалия магнитного поля, связанная с кратером, формируется большим объемом пород, измененных в результате удара астероида: импактитами и породами, перемещенными в результате удара. Аномальное магнитное поле каждого возникшего кратера зависит как от скорости и массы падающего тела (его кинетической энергии, зависимость от других свойств ударника, таких как состав, форма, прочность, мы не рассматриваем), так и от свойств поверхности, о которую ударяет астероид, – мишени. Проведенное ранее численное моделирование аномального магнитного поля кратера Босумтви [1, 2], близкого по размеру (и возрасту) к кратеру Жаманшин (Казахстан, координаты 48°24' С. Ш., 60°58' В. Д.), позволяет провести анализ аномального магнитного поля кратера Жаманшин. Численное моделирование магнитной аномалии кратера позволяет изучить кратер наряду с методами бурения, гравиметрии, сейсморазведки, каротажа и другими, комплексно применяемыми в геологоразведке. Особенности АМП кратера Жаманшин согласуются с результатами численного моделирования. Картина магнитного поля указывает на наличие слоя импактитов в глубине кратера. Средняя магнитная восприимчивость пород мишени оценивается как 0.0003 SI.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900176-3).

Литература

1. Кузьмичева М.Ю., Иванов Б.А. Моделирование магнитной аномалии, связанной со сложным кратером, на примере кратера Босумтви // *Астрономический Вестник*. 2020. Т. 54. № 5. С. 397–408.
2. Кузьмичева М.Ю., Иванов Б.А. Моделирование магнитной аномалии сложного метеоритного кратера Босумтви (Гана) с учетом ударного размагничивания и морфологических особенностей // *Физика Земли*. 2021. № 5. С. 242–253.

ANOMALOUS MAGNETIC FIELD OF THE ZHAMANSHIN CRATER: ANALYSIS USING THE RESULTS OF NUMERICAL MODELING

M. Kuzmicheva^{1, *}, B. Ivanov¹

¹Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: mukuzmgm@gmail.com

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ И НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСШИРЕННОГО КОМПЛЕКСА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКВАЖИН

Д. Ю. Куприн¹, Н. Д. Архипов^{1, 2, *}, Н. В. Дубиня^{1, 2}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли имени О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

*E-mail: cherrykolya@mail.ru

Геофизические исследования скважин – один из важных источников информации о свойствах и строении горных пород, слагающих верхние слои Земной коры. На месторождениях со сложной геологической обстановкой используется расширенный комплекс геофизических исследований скважин, включающий в себя, помимо прочих исследований, методы, позволяющие получить информацию об изменении отдельных характеристик горных пород в различных азимутальных направлениях (скважинные имиджи). Интерпретация скважинных имиджей позволяет получить важную информацию о строении горных пород, окружающих скважину, в особенности, позволяет выделить и характеризовать такие структурные элементы околоскважинного пространства как естественные трещины. Проведение интерпретации расширенного комплекса геофизических исследований скважин является достаточно сложной и трудоёмкой задачей, которая зачастую проводится в ручном режиме. При такой ручной интерпретации существует риск ошибки, не выделения, или некорректного выделения естественных трещин, и, соответственно, некорректного определения их характеристик. В рамках данной работы предлагается решение этой проблемы, которое заключается в разработке автоматизированного алгоритма интерпретации скважинных имиджей с применением алгоритмов компьютерного зрения и нейронной сети для выделения естественных трещин и определения их характеристик. Перед непосредственной обработкой скважинных имиджей с помощью алгоритмов компьютерного зрения и нейронной сетью необходима их предобработка [2], для исключения влияния шума и артефактов записи, которые вероятно возникли во время проведения исследования. Процедуры предобработки включают в себя различные виды фильтрации изображения [6], а также интерполяцию линейных артефактов при помощи генеративно-состязательной нейросети [7]. Далее следует обработка скважинных имиджей алгоритмами компьютерного зрения, включающими в себя: сверточную нейронную сеть для нахождения границ на изображении [4], бинаризацию [3] и её производные методы, а также обработку градиентов скважинного имиджа на предмет выделения границ [1, 5]. Результат работы алгоритмов компьютерного зрения и нейронной сети далее используется для вычисления вероятного расположения естественной трещины на скважинном имидже и вычисления её геометрических характеристик.

Литература

1. *Canny J.A* Computational Approach to Edge Detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1986. Vol. PAMI-8 (6). P. 679–698. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1986.4767851>
2. *Getreuer P.* A Survey of Gaussian Convolution Algorithms // Image Processing On Line. 2013. Vol. 3. P. 286–310. <https://doi.org/10.5201/ipol.2013.87>.
3. *Otsu N.* A threshold selection method from gray-level histograms // IEEE Trans. Sys., Man., Cyber.: journal. 1979. Vol. 9. P. 62–66.
4. *Poma X.S., Riba E., Sappa A.* Dense extreme inception network: Towards a robust cnn model for edge detection: Proceedings of the IEEE/CVF winter conference on applications of computer vision. 2020. C. 1923–1932.
5. *Scharr H.* Optimal Operators in Digital Image Processing // Dissertation (in German). 2000.
6. *Shreyamsha Kumar B.K.* Image denoising based on non-local means filter and its method noise thresholding // Signal, image and video processing. 2013. T. 7. C. 1211–1227.
7. *Sun Q. et al.* Blank Strip Filling for Logging Electrical Imaging Based on Multiscale Generative Adversarial Network // Processes. 2023. Vol. 11 (6). C. 1709.

ON THE CAPABILITY OF COMPUTER VISION AND NEURAL NETWORKS METHODS IN PROCESSING THE RESULTS OF AN EXTENDED SUITE OF WELL LOGS

D. Kuprin¹, N. Arkhipov^{1, 2, *}, N. Dubinya^{1, 2}

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

*E-mail: cherrykolya@mail.ru

УТОЧНЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ПОРОД КОЛЛЕКТОРОВ УГЛЕВОДОРОДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ УПРУГИХ СВОЙСТВ

Д. Ю. Куприн^{1, *}, И. О. Баюк¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли имени О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: kuprin.daniil.geo@gmail.com

Целью представленного исследования являлось моделирование эффективных упругих свойств пород коллекторов для уточнения их микроструктуры. Объектом исследования были выбраны породы бассейна Таранаки, расположенного на западном побережье Северного острова Новой Зеландии, а именно – нефтеносные глинистые песчаники. Модельная среда была упрощена до пяти компонент различной формы, слагающих горную породу: кварца, плагиоклаза, глины, кальцита и пустотного пространства, заполненного флюидом. В ходе исследования были опробованы несколько распространённых методов теории эффективных сред для получения модельных значений упругих модулей горной породы определённой конфигурации, в числе которых: методы Фойгта и Ройсса, метод Хашина-Штрикмана, метод Кастора-Токсоза и метод самосогласования Берримана. Методы Фойгта [5], Ройсса [4] и Хашина-Штрикмана [2] позволяют учесть только объёмное содержание компонент горной породы и её пористость, но не позволяют учесть форму пустотного пространства. Данные подходы позволяют получить верхнюю и нижнюю границы вероятных значений упругих модулей горной породы. Методы Кастора-Токсоза [3] и самосогласования Берримана [1], позволяют учесть как объёмное содержание компонент, слагающих горную породу и её пористость, так и геометрию пустотного пространства путём задания формы и аспектного отношения пустот. При моделировании был использован метод Берримана для построения модели горной породы. Формы компонент горной породы были приняты следующие: включения кварца, плагиоклаза и кальцита – сферические; включения глины – монетообразные; пустотное пространство также было принято монетообразным, аспектное отношение варьировалось от 0.001 до 0.095. Полученная модель была использована для решения обратной задачи, а именно, для восстановления форм пустотного пространства горных пород по данным акустического каротажа. Для решения этой задачи была построена палетка эффективных скоростей продольных волн для моделируемой среды, на которую были нанесены результаты акустического каротажа. В ходе анализа полученных результатов модель была признана физической. Однако с геологической точки зрения модель некорректна, так как согласно модели, участки моделируемой горной породы имеют слишком маленькие аспектные отношения пустот при повышенных значениях пористости. Результаты моделирования приводят к необходимости построения более сложной, литологически обоснованной модели, учитывающей разделение пустотного пространства на поровую часть, примыкающую к изометричным зёрнам алевритовой фракции, и трещинную, находящуюся в области неизометричных пластин глинистых минералов.

Литература

1. Berryman J.G., Milton, G.W. Microgeometry of random composites and porous media // J. Physics D. 1988. Vol. 21. P. 87–94.
2. Hashin Z., Shtrikman S. A variation approach to the elastic behavior of multiphase materials // J. Mech. Phys. Solids. 1963. Vol. 11. P. 127–140.
3. Kuster G.T., Toksoz M.N. Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media // Geophysics. 1974, Vol. 39. P. 587–618.
4. Reuss A. Berechnung der Fließgrenzen von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung für Einkristalle // Z. Ang. Math. Mech. 1929. Vol. 9. P. 49–58.
5. Voigt W. Bestimmung der Elastizitätskonstanten von Eisenglanz. // Ann. Phys. 1907. Vol. 24. P. 129–140.

CLARIFICATION OF RESERVOIR ROCK MICROSTRUCTURE WITH THE USE OF MATHEMATICAL MODELLING METHODS OF EFFECTIVE ELASTIC PROPERTIES

D. Kuprin^{1, *}, I. Bayuk¹

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: kuprin.daniil.geo@gmail.com

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗМОЖНОЙ ПОГРЕШНОСТИ МЕЖДУ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ N-КОМПОНЕНТЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО ДАТЧИКА И НАПРАВЛЕНИЕМ НА ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ СЕВЕР

А. С. Кухмазов^{1, *}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: A-Kukhmazov@mail.ru

В данном докладе рассказывается об экспериментальной методике определения угла горизонтальной ориентации сейсмометра по результатам обработки записей сигналов поверхностных и объемных волн от телесейсмических источников колебаний.

Северная компонента сейсмометра должна быть правильным образом ориентирована на географический (истинный) северный полюс. Географическим северным полюсом называется та точка на планете, где линии меридиан (долгот) сходятся на севере. Зачастую датчики на сейсмических станциях могут быть ориентированы по компасу, прибору для ориентирования, указывающему своей северной частью магнитной стрелки не на истинный северный полюс, а на магнитный. Положение магнитного северного полюса отличается от истинного на расстоянии около 500 км на сегодняшний день; кроме того, магнитный северный полюс постоянно мигрирует с переменной скоростью от 10 до 40 км в год. Если не учитывать магнитное склонение, и не вводить в показания компаса поправку за это магнитное склонение, то датчик может быть ориентирован в неверном направлении. Показания компаса могут также отличаться даже от направления на магнитный северный полюс при производстве измерений в помещении.

Были использованы методы определения угла горизонтальной ориентации сейсмометра по данным результатов обработки поверхностных волн, а также объемных волн.

Вышеперечисленные методы решения задачи контроля правильной ориентации горизонтальных компонент сейсмических станций на север и восток, а также экспериментального вычисления обратного азимута и угла падения, были опробованы на примере записей двух сейсмических станций, «Апатиты» (APZ9) и «Ловозеро» (LVZ), расположенных на Кольском полуострове, на высоких широтах, что может внести затруднение при определении точного значения магнитного склонения.

По данным результатов обработки поверхностных волн осредненное значение угла горизонтальной ориентации сейсмометра для станции APZ9 было определено как $9.3^\circ \pm 0.7^\circ$ на уровне коэффициента взаимной корреляции 0.8 и выше. Для станции LVZ осредненное значение было определено как $1.5^\circ \pm 0.6^\circ$ также на уровне коэффициента взаимной корреляции 0.8 и выше.

По данным результатов обработки объемных волн осредненное значение угла горизонтальной ориентации сейсмометра для станции APZ9 было определено как $16.2^\circ \pm 1.2^\circ$. Для станции LVZ осредненное значение было определено как $11.4^\circ \pm 2.7^\circ$.

Полученные результаты говорят о возможном некотором смещении угла ориентации горизонтальной компоненты сейсмических датчиков, участвующих в обработке.

EXPERIMENTAL METHODS FOR DETERMINING THE POSSIBLE ERROR BETWEEN THE ACTUAL ORIENTATION OF THE HORIZONTAL N-COMPONENT OF A SEISMIC SENSOR AND THE DIRECTION TO THE GEOGRAPHICAL NORTH

A. S. Kukhmazov^{1, *}

¹Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: A-Kukhmazov@mail.ru

СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ КАК ОСНОВА МОДЕЛИ ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЕ

Е. А. Левина^{1,*}, В. В. Ружич¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

*E-mail: levina@crust.irk.ru

Произошедшие в феврале 2023 г. в Турции землетрясения с $M > 7$, приведшие к большим материальным потерям и человеческим жертвам, в очередной раз показали актуальность темы прогноза землетрясений. Как известно, для прогноза поведения любой системы необходимо составить ее модель, учитывающую основные влияющие на нее факторы. Любой прогноз должен содержать три параметра – указание на место, энергию и время ожидаемого землетрясения.

В предпринятой в данной работе попытке составить модель подготовки землетрясений для условий БРЗ в качестве прогнозных признаков рассматривались: 1 – наличие сейсмической брешы, 2 – наличие предшоковой активизации и сейсмического затишья, 3 – наличие сейсмоактивного разлома или разломного узла. Использовался каталог землетрясений БРЗ, предоставленный Байкальским филиалом Геофизического центра СО РАН (г. Иркутск).

Каталог землетрясений фактически является представленной в табличной форме функцией вида $E = f(\phi, \lambda, t)$, где E – энергия события, ϕ, λ – его географические координаты, t – время, когда событие произошло. Для обнаружения сейсмических брешей (признак 1) строится распределение сейсмической энергии, подсчитанное за определенный промежуток времени с помощью пространственного окна. То есть рассматриваемая функция приобретает вид $E = f(\phi, \lambda)$ и задача сводится к поиску локальных минимумов в полученной матрице. Выявленные минимумы считаются брешью, если в соответствующем окне есть фрагмент сейсмоактивного разлома (признак 3). Для этого необходим их перечень с указанием координат и степени активности.

В основе разработанной двухстадийной модели подготовки сейсмического события лежат представления о том, что сильному землетрясению («шоку»), как правило, предшествует стадия предшоковой сейсмической активизации и сейсмическое затишье. Предполагается, что по максимальной энергии событий в предшоковой стадии и длительности затишья можно судить об энергии ожидаемого землетрясения и времени его реализации (признак 2). С этой целью для определенной территории строится распределение выделившейся сейсмической энергии, подсчитанное с помощью временного окна. В этом случае выше упомянутая функция сводится к виду $E = f(t)$ и поиск предшоковой активизации заключается в нахождении локального максимума временного ряда.

Расчеты, сделанные для всех 16 событий с $K \geq 15$, произошедших в БРЗ с 1963 по 2022 гг., показали, что наличие протяженного активного разлома и длительно существующей брешы может служить весомым основанием для формализованного способа выявления мест ожидаемых землетрясений. При этом соотношение энергии произошедшего землетрясения K_3 и энергии максимального землетрясения предшоковой стадии K_{np} составляет $K_3 - K_{np} = 2.3 (0.7)$, а средняя длительность затишья $T_{зтш} = 5.7 (3.4)$ лет, где в скобках указаны средние квадратичные отклонения. Видно, что разброс длительности затишья достаточно большой, поэтому для уточнения параметра Время необходимо привлекать дополнительную информацию.

SEISMIC GEOLOGICAL FEATURES AS THE BASIS OF THE MODEL PREDICTION OF EARTHQUAKES IN THE BAIKAL RIFT ZONE

E. A. Levina^{1,*}, V.V. Ruzhich¹

¹Institute of the Earth Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*E-mail: levina@crust.irk.ru

СИСТЕМЫ АРЕАЛЬНОГО РИФТИНГА КАК ОТРАЖЕНИЕ 3D СДВИГОВОГО ТЕЧЕНИЯ ГОРНЫХ МАСС

М. Г. Леонов^{1, *}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геологический институт РАН, Москва, Россия

*E-mail: mgleonov@yandex.ru

В пределах континентальных массивов известны сообщества чередующихся отрицательных (впадины) и положительных (поднятия) морфоструктур. Эти провинции известны как зоны ареального рифтинга, тафрогены, зоны линейного коробления. Их рассматривают обычно в общем контексте проявления процесса рифтогенеза. Механизм образования «ареальных» рифтогенов не однозначен. Рассмотрены Гиссаро-Алайский и Центральный сегменты Тяньшаньского альпийского орогена, Провинция бассейнов и хребтов (Северная Америка), Селенгино-Витимская зона (Западное Забайкалье), Зондский шельф Южно-Китайского моря. Для этих структурно-тектонических провинций характерны: морфоструктура, выраженная в закономерном чередовании прогибов (грабенов) и разделяющих их поднятий (хребтов, горстов, валов); распространение парагенеза «впадина/поднятие» в виде широких ареалов, приуроченных к окраинным частям континентальных плит или к внутриконтинентальным орогенам; отсутствие магистральных рифтовых долин и разломов; отсутствие сквозных разрывов континентальной коры; объемное разрыхление и твердо-пластическое (реидное) течение горных масс фундамента. Динамо-кинематическая обстановка их развития определяется 3D твердо-пластичным перераспределением горных масс при наличии объемного сдвигового поля напряжений и регулирующей роли фрактальной организации геологического пространства. Для категории структур, которые характеризуются диффузным характером расположения осадочных бассейнов и разделяющих их поднятий, процесс рифтогенеза не является «инициальным». Системы грабенов и горстов возникают на месте пликативных изгибов земной поверхности на той стадии, когда крутизна и амплитуда изгибной деформации приводит к превышению предела прочности горных пород. Рассмотренные объекты представляют собой особый тип коровых морфотектонических ансамблей, для которых логично использовать следующие дефиниции: морфологическую – «провинции бассейнов и хребтов» (название введено для подобного объекта, расположенного на западе Северо-Американского кратона); структурно-генетическую – «области ареально-линейного коробления» (термин использован Г. Ф. Уфимцевым для Селенгино-Витимской зоны Западного Забайкалья).

Исследование выполнено по теме НИР Геологического института РАН.

AREAL RIFTING SYSTEMS AS A REFLECTION OF 3D SHEAR FLOW OF ROCK MASSES

M. G. Leonov^{1, *}

¹Geological Institute of RAS, Moscow, Russia

*E-mail: mgleonov@yandex.ru

ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В F-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ ПО МАТЕРИАЛАМ СТАНЦИЙ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ТОКИО, ВАККАНАЙ, ЯМАГАВА, ТАШКЕНТ

Е. В. Липеровская^{1, 2, *}

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

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: liper@ifz.ru

В литературе указывалось как на положительные, так и на отрицательные вариации плотности ионизации ионосферы за несколько суток до землетрясения, также отмечалось различие отклика ионосферы днем и ночью. В большинстве случаев эти выводы делались на основе анализа отдельных событий. Ниже представлены результаты статистической верификации этих результатов. Проведен анализ суточного хода foF2 в окрестности землетрясений с глубинами $H < 70$ км и магнитудами $M_w > 5.5$ с использованием почасовых ионосферных данных foF2, полученных на станциях наземного вертикального зондирования (ВЗ) Токио, Ямагава, Вакканай за 1957–2020 гг., (Япония) и Ташкент за 1964–1996 гг. (данные представлены в Интернете). Критическая частота foF2 $\sim \sqrt{N_{\max}}$, где $N_{\max}$ – максимальная плотность ионизации области F. Использовался каталог землетрясений ISC GEM с 1957 по 1975 гг. и GCMT с 1976 по 2020 гг. Исключались дни, когда геомагнитные возмущения большие, $\Sigma Kp > 25$, и последующие сутки. Для каждого часа рассматривались отклонения foF2 от скользящей медианы, нормированные на эту же медиану за промежуток (–7, +7) суток для каждого i -го часа. Исключалась возможность неоднократного учета одних и тех же интервалов времени, для чего проводилась сортировка по магнитуде землетрясений, начиная с сильнейшего. Данные за (–240, +240) часов до и после сильнейшего землетрясения исключались из дальнейшего анализа; процедура повторялась для следующего по магнитуде землетрясения. Далее было проведено наложение эпох Δf и построена двумерная картина усредненных вариаций Δf в зависимости от расстояния от станции ВЗ до эпицентра (до 2000 км) и от времени (–10, +10) сут до и после события и получены следующие статистически достоверные результаты: 1. Для континентальных землетрясений в окрестности Ташкента, сейсмоионосферные эффекты в вариациях foF2 наблюдались для событий с магнитудами $M5.5+$, в регионе Японии порог по магнитуде для порождающих аномалии событий выше – $M6+$. 2. Перед землетрясениями, расположенными южнее Ташкента, южнее Ямагавы и севернее Токио на расстояниях до 1000–1500 км наблюдалось увеличение foF2. Для землетрясений, расположенных между Токио и Ямагавой (южнее Токио и севернее Ямагавы) по данным станции Ямагава наблюдается уменьшение перед землетрясениями, по данным станции Токио аномалия отсутствовала. Природа таких различий, а равно и их не случайность, остаются не ясными. 3. Статистически вполне убедительных различий в амплитуде вариаций в дневное и ночное время не было обнаружено. 4. Заключаем, что вполне убедительных однозначных результатов, по-видимому, не дает не только рассмотрение отдельных случаев (которые очень разнообразны), но и статистическое рассмотрение методом наложения эпох. Получаемые, даже формально статистически вполне убедительные результаты, не складываются в простую единообразную схему. Получение вполне однозначных результатов, по-видимому, потребует значительного увеличения объема фактических данных и/или привлечение иного статистического аппарата и развитых физических представлений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 23-27-00395).

PRECURSORS OF EARTHQUAKES IN THE F-REGION OF THE IONOSPHERE BASED ON THE DATA OF VERTICAL SOUNDING STATIONS TOKYO, WAKKANAI, YAMAGAWA, TASHKENT

E. V. Liperovskaya^{1, 2, *}

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth, of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: liper@ifz.ru

ТРУДНОСТИ ОБОСНОВАНИЯ АНТРОПОГЕННОЙ КОНЦЕПЦИИ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ И АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ МЕХАНИЗМ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Л. И. Лобковский^{1, *}, И. П. Семилетов², А. А. Баранов³, И. С. Владимирова¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской Академии наук, Москва, Россия

*E-mail: llobkovsky@ocean.ru

Антропогенная концепция потепления климата в последнее время подвергается сомнению. В частности, положенная в основу данной концепции картина изменения средней температуры за последнюю тысячу лет в форме «хоккейной клюшки», демонстрирующая резкий подъем температуры, начиная с 1980 г. на фоне тысячелетнего периода относительно постоянного температурного уровня, является неадекватной, поскольку игнорирует хорошо задокументированный средневековый климатический оптимум, когда температура Земли была сопоставима с сегодняшней при отсутствии промышленных выбросов углекислого газа. Сомнения в справедливости антропогенной концепции также возникают при сопоставлении временного хода изменения средней температуры и объема промышленных выбросов углекислого газа в современную эпоху в XX веке. Вместо ожидаемой корреляции этих процессов, на некоторых существенных отрезках времени наблюдается их антикорреляция. Данная ситуация предопределяет поиск альтернативных объяснений феномена резкого потепления климата. В докладе изложен геодинамический подход к объяснению современных климатических изменений на основе сейсмогенно-триггерной гипотезы генерации выбросов метана в атмосферу из осадочных пород арктического шельфа и прилегающей суши. Суть этой гипотезы состоит в том, что метан, содержащийся в микропорах мерзлых пород в запертом состоянии, может быть освобожден в результате разрушения микроструктуры среды из-за добавочных напряжений, вызванных триггерным эффектом деформационных волн, проходящих через газонасыщенные области осадочных толщ. Сами волны генерируются сильнейшими землетрясениями, происходящими в зонах субдукции. При характерной скорости деформационных волн порядка 100 км/год они проходят расстояние около 2000–2500 км от Алеутской и Курило-Камчатской зон субдукции до Арктической зоны примерно за 20–25 лет. Это соответствует разнице во времени между серией наиболее мощных землетрясений с магнитудой больше 8.5, произошедших в этих зонах в интервале 1952–1965 гг., и началом резкого потепления климата в 1980 г. После запуска процесса фильтрации газа в результате разрушения микроструктуры пор и резкого повышения проницаемости геосреды вследствие воздействия деформационной волны процесс эмиссии метана может продолжаться автономно в течение десятков и даже сотен лет в зависимости от толщины нарушенного газонасыщенного слоя. Этим объясняется продолжающаяся эмиссия метана на арктическом шельфе последние сорок с лишним лет после инициировавших ее сильнейших землетрясений середины прошлого века.

PROBLEMS IN THE ANTHROPOGENIC CONCEPT OF GLOBAL WARMING AND AN ALTERNATIVE MECHANISM OF CLIMATE CHANGE

L. I. Lobkovsky^{1, *}, I. P. Semiletov², A. A. Baranov³, I. S. Vladimirova¹

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

³Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: llobkovsky@ocean.ru

ОПТИЧЕСКИЕ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ «СЕВЕРНАЯ ЗВЕЗДА I» И «СЕВЕРНАЯ ЗВЕЗДА II»

Т. В. Лосева¹*, Е. М. Урвачев¹, Е. С. Гончаров¹, А. Н. Ляхов¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: losseva@idg.chph.ras.ru

В 90-х годах прошлого столетия ИДГ РАН провел ряд активных геофизических ракетных экспериментов (АГРЭ) с инъекцией высокоскоростных плазменных струй в ионосферу Земли с целью исследования отклика ионосферы на известное возмущение на разных высотах, в средних и высоких широтах, при разных гелиогеофизических условиях. Одной из целей этих экспериментов являлась проверка теоретических моделей динамики свободной плазмы, которую невозможно осуществить в условиях лабораторного эксперимента. В экспериментах «Флаккус» (высота 140 км – средние широты) и «Северная звезда I, II» (360 и 280 км соответственно – высокие широты) для инъекции струй алюминиевой плазмы использовались, созданные в ИДГ РАН, взрывные кумулятивные плазменные генераторы ВГПС с максимальной энергией плазмы 6 МДж. В отличие от экспериментов «Флаккус» и «Северная звезда II», в эксперименте «Северная звезда I» непосредственно перед инъекцией алюминиевой плазмы перед генератором плазменной струи был выпущен сухой воздух для изучения влияния нейтральной фоновой атмосферы на параметры струи. После окончания инъекции алюминиевой струи в экспериментах начинался разлет продуктов взрыва генератора. Результаты численного моделирования начальной стадии динамики плазмы в экспериментах «Флаккус» и «Северная звезда II» (без учета последующего за инъекцией разлета продуктов взрыва) приведены в работах [1, 2]. Цель настоящего исследования заключается в изучении влияния на динамику плазмы в экспериментах «Северная звезда I, II» выпуска сухого воздуха и разлета продуктов взрыва. Численное моделирование этих процессов проводилось с помощью радиационно-газодинамического кода FRONT [3], основанного на явной схеме Годуновского типа на фиксированной эйлеровой сетке (RZ геометрия). Получены пространственные распределения газодинамических параметров воздуха, алюминия, а также вещества продуктов взрыва в различные моменты времени до миллисекундных времен. Приводятся изображения искусственных плазменных образований в видимом диапазоне длин волн при наблюдении сбоку с расстояния 1 км. Расчетные плотности потоков излучения согласуются с соответствующими данными наблюдений с оптического модуля OSP для обоих экспериментов «Северная Звезда I» и «Северная Звезда II».

Литература

1. Лосева Т.В., Косарев И.Б., Поклад Ю.В., Ляхов А.Н., Зецер Ю.И., Урвачев Е.М. Численное моделирование начальной стадии динамики высокоскоростной плазменной струи в активных геофизических ракетных экспериментах «Флаккус» и «Северная звезда» // Физика плазмы. 2022. Т. 48. С. 956–961. <https://doi.org/10.31857/S0367292122600583>

2. Лосева Т.В., Голубь А.П., Косарев И.Б., Поклад Ю.В., Ляхов А.Н., Зецер Ю.И. Характеристики плазменной струи взрывного генератора в экспериментах «Флаккус»: измерения и численное моделирование // Динамические процессы в геосферах. Вып. 13. М.: ИДГ РАН. 2021. С. 175–186. https://doi.org/10.26006/22228535_2021_1_175

3. Глазырин С.И. Исследование горения в сверхновых типа Ia // Письма в Астрономический журнал. 2013. Т. 39. С. 249–254. <https://doi.org/10.1134/S1063773713040026>

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (№ FMWN-2022-0021).

OPTICAL AND GAS-DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A HIGH-SPEED PLASMA JET IN THE EXPERIMENTS «NORTH STAR I» AND «NORTH STAR II»

T. V. Losseva¹*, E. M. Urvachev¹, E. S. Goncharov¹, A. N. Lyakhov¹

¹Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: losseva@idg.chph.ras.ru

ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭКСТРЕМУМОВ МГНОВЕННЫХ АМПЛИТУД И ЧАСТОТ ТРЕМОРА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

А. А. Любушин^{1, *}, Е. А. Родионов¹

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

*E-mail: lyubushin@yandex.ru

Предлагается метод анализа тремора земной поверхности, измеряемого средствами космической геодезии с целью выделения прогностических эффектов. Метод иллюстрируется на примере совместного анализа совокупности синхронных временных рядов ежесуточных вертикальных смещений земной поверхности на Японских островах для интервала наблюдений 2009–2023 гг. Анализ представляет собой пример обработки «больших данных» системы геофизического мониторинга и основан на разбиении исходных данных (1047 временных рядов) на блоки (кластеры станций) и последовательном применении метода главных компонент. Разбиение сети станций на кластеры производится методом К-средних из критерия максимума псевдо-F-статистики и для Японии оптимальное число кластеров получилось равным 15. К временным рядам главных компонент от блоков станций применяется метод разложения Хуанга на последовательность независимых эмпирических мод колебаний (EMD – Empirical Mode Decomposition) и последующее вычисление для них мгновенных амплитуд и частот с помощью преобразования Гильберта. Для обеспечения устойчивости оценок волновых форм EMD разложения перед преобразованием Гильберта производилось усреднение 1000 независимых аддитивных реализаций белого шума ограниченной амплитуды.

С помощью параметрической модели интенсивностей взаимодействующих точечных процессов анализируются связи между моментами времени последовательностей времен наибольших локальных максимумов и наименьших локальных минимумов усредненных по числу кластеров мгновенных амплитуд и частот и временами землетрясений в окрестности Японских островов с минимальными порогами магнитуд 5.5, 5.8, 6.0 и 6.5. Показано, что в среднем моменты времени наиболее выразительных локальных экстремумов мгновенных амплитуд и частот тремора предшествуют возникновению сейсмических событий в окрестности Японии.

PREDICTIVE PROPERTIES OF EXTREMES OF INSTANTANEOUS AMPLITUDES AND FREQUENCIES OF EARTH SURFACE TREMOR

A. A. Lyubushin^{1, *}, E. A. Rodionov¹

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: lyubushin@yandex.ru

ПРОЦЕССЫ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЖЕСТКОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А. Н. Ляхов^{1, *}, Т. В. Лосева¹, Е. М. Урвачев¹, Е. С. Гончаров¹, С. З. Беккер¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: alyakhov@idg.ras.ru

В докладе представлены результат исследований, выполненных в ИДГ РАН, по проблеме изучения отклика ионосферы Земли на воздействие жесткого электромагнитного излучения. Основная часть доклада посвящена описанию отклика ионосферы на рентгеновское излучение солнечных вспышек. Представлено описание разработанных малокомпонентных ионизационно-рекомбинационных моделей нижней атмосферы, использующих эмпирические модели нейтральной атмосферы серии MSIS и статистическую модель атмосферы, созданную по измерениям на ИСЗ AURA. Приведены результаты верификации моделей по данным регистрации сигналов СДВ передатчиков.

Малокомпонентные ионизационно-рекомбинационные модели достаточно уверенно справляются с задачей прогноза распространения сигналов СДВ радиостанций. Однако для изучения возможно более широкого спектра воздействий на среду была разработана многокомпонентная модель нижней ионосферы, включающая процессы с малыми нейтральными компонентами. С использованием новой модели была решена задача редукции набора химических процессов, требуемых для описания отклика атмосферы на импульсы ионизации разной длительности (от 100 нсек до 100 минут). В докладе представлены результирующие графы химических процессов для диапазона высот 20–90 км.

Исследование отклика верхней атмосферы на потоки ионизирующего излучения требует использования источника с хорошо известными параметрами. В качестве такого источника предлагается использовать куммуляцию струй, созданных плазменными генераторами серии ВГПС. В докладе представлены результаты верификации разработанной радиационно-газодинамической модели по данным активных ракетных экспериментов FLUXUS и NORTH STAR и численного моделирования радиационно-газодинамической стадии слияния плазменных струй, сопровождающейся генерацией жесткого УФ и мягкого рентгеновского излучения.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (№ FMWN-2022-0021).

THE PROCESSES IN THE IONOSPHERE UNDER THE EXTREME ELECTROMAGNETIC RADIATION

A. N. Lyakhov^{1,*}, T. V. Losseva¹, E. M. Urvachev¹, E. S. Goncharov¹, S. Z. Bekker¹

¹Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: alyakhov@idg.ras.ru

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОБРАЗОВАНИЯ БУГРОВ ПУЧЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ЗОНЕ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ ВСЛЕДСТВИЕ РАЗЛОЖЕНИЯ ГАЗОГИДРАТОВ

О. Н. Малинникова^{1, *}, В. Н. Одинцев¹, В. А. Бобин¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: olga_malinnikova@mail.ru

В зоне вечной мерзлоты встречаются достаточно ровные холмы (бугры пучения) высотой до десятков метров, их ядро составляет главным образом лед. Существуют различные представления о природе и механизме их образования. Мы рассматриваем новые модели, в которых бугры пучения являются следствием разложения в ледопородном грунте скоплений зернистых газогидратов.

Газогидраты разлагаются при малых отрицательных температурах и давлении около 2 МПа на метан и воду. Объем метана при разложении газогидрата примерно в 80 раз больше объема твердого вещества. Разложение газогидратов может быть вызвано климатическими изменениями и представлять собой длительный процесс вследствие наличия эффекта самоконсервации.

В моделях полагается, что разложение зерна газогидрата обуславливает развитие на его границе трещинно-поры. Количество свободного метана, давление, объем трещинно-поры и температура описываются соотношениями, связывающими (1) количество образующегося свободного метана с его давлением в поре, (2) радиус поры с ростом давления метана в предположении вязко-упругости материала и (3) уравнением состояния идеального газа. Показано, что при разложении зерна газогидрата трещинно-пора может увеличить объем в десятки раз. В области скопления газогидратов может расти множество пузырьков метана. Этот процесс можно определить как «ледяное кипение». Вследствие увеличения объема трещинно-пор увеличивается удельный объем ледогрунтового массива, если позволяют условия его стеснения.

В работе рассматриваются две модели макро деформации ледогрунтового массива в зависимости от условий стеснения области скопления газогидратов. В первой модели рассматривается скопление газогидратов в горизонтальном пласте на небольшой глубине. В этом случае условия стеснения допускают объединение трещинно-пор в магистральную горизонтальную трещину разрыва пласта, наполненную свободным метаном под давлением. Показано, что эта трещина, первоначально произвольной конфигурации в пласте, при своем росте стремится к круговой форме. Показано также, что возможна бифуркация в трещинообразовании, а именно остановка в росте горизонтальной трещины и развитие цилиндрической сдвиговой трещины, с радиусом примерно равным радиусу горизонтальной трещины и растущей от нее в направлении земной поверхности. В этом случае сдвигание цилиндрической ледогрунтовой массы, ограниченной сдвиговой трещиной, может проявляться как образование и рост бугра пучения. Этот процесс может закончиться срывом сцепления на поверхности цилиндрической трещины с последующим выбросом грунта и газа. Однако более вероятен сценарий с локальным прорывом метана на земную поверхность, что должно привести к падению давления газа в газовой полости и оседанию бугра.

Во второй модели рассматривается уходящее в глубину столбообразное скопление газогидратов. В условиях бокового стеснения вмещающих пород образование магистральной трещины невозможно, поэтому увеличивающаяся в объеме ледогрунтовая масса с разлагающимися газогидратами должна расширяться вверх, в направлении земной поверхности. Рассмотрены вязко-упругая и вязко-пластичная модели деформации ледогрунтовой массы. Расчеты показали, что сдвигание ледогрунтовой массы вверх изменяет напряженно-деформированное состояние среды и создает благоприятные условия для смещения фронта разложения газогидратов вглубь ледогрунтовой толщи.

Таким образом в природе может реализоваться самоподдерживающийся режим разложения газогидратов и подъема ледогрунтовой массы. Показано, что высота бугра зависит от мощности области скопления газогидратов. При этом она определяется условием равенства силы, выталкивающей ледопородную массу и зависящей от условий разложения газогидрата, и веса смещающейся массы.

Модели деформации с вязкостью позволяют объяснить, как конусообразную, так и сглаженную форму бугров. В заключении сделаны оценки характерного времени развития процессов образования бугров по первой и второй моделям.

GEOMECHANICAL MODELS OF THE HILLOCK FORMATION IN THE PERMAFROST ZONE DUE TO THE DECOMPOSITION OF GAS HYDRATES

O. N. Malinnikova¹, *, V. N. Odintsev¹, V. A. Bobin¹

¹*Mel'nikov Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**E-mail: olga_malinnikova@mail.ru*

ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ ИОНОСФЕРЫ NEQUICK НА ДАННЫХ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ

Б. А. Матюшин^{1, *}, В. И. Захаров^{1, 2, 3}, Н. А. Сухарева^{1, 4}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики атмосферы, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова Российской академии наук, Москва, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

⁴Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: borymandy@gmail.com

Представлены результаты изучения систематических ошибок модели ионосферы NeQuick 2, проверка которой проводилась на данных спутниковых измерений электронной концентрации миссии ESA SWARM за 2014 год. В работе использованы измерения, проведенные зондами Ленгмюра, установленными на космических аппаратах указанной миссии, находящихся на орбитах выше уровня максимума F2 слоя. Данные 2014 года относятся к периоду максимума солнечной активности, в который были выделены с помощью анализа Kp индекса периоды возбужденных и спокойных геомагнитных условий. Проведенные исследования позволили определить текущие и среднегодовые ошибки моделирования и их стандартные отклонения в различных широтных зонах и геомагнитных условиях и получить пространственные распределения систематических отклонений модели от данных измерений, которые позволяют выделить области повышенных ошибок.

Модель NeQuick используется для расчетов, проводимых с целью коррекции задержки сигналов в ионосфере, но наши исследования показывают, что характерные текущие значения отклонений модели от in-situ измерений составляют порядка десятков процентов, причем в условиях геомагнитного возмущения ошибка в определенных географических областях еще больше. Зоны повышения систематических отклонений наблюдаются в средних широтах южного полушария и в полярных широтах. Отмечено, что среднегодовые значения, как и стандартные отклонения ошибок растут с высотой. Наибольшие отклонения наблюдаются в периоды геомагнитных бурь в полярных широтах, в рамках имеющихся данных двух высотных уровней, на высотах 530 км.

Результаты работы могут быть полезны для прогноза работы радиотехнических средств и различных приложений, например, для улучшения навигации и связи при уточнении и совершенствовании оперативных моделей ионосферы.

TESTING IONOSPHERIC MODEL NEQUICK FOR THE SATELLITE MEASUREMENTS OF THE ELECTRON DENSITY

B. A. Matiushin^{1, *}, V. I. Zakharov^{1, 2, 3}, N. A. Suhareva^{1, 4}

¹Moscow State University, Faculty of Physics, Atmospheric Physics Department, Moscow, Russia

²A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁴Skobeltsyn Research Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, Russia

*E-mail: borymandy@gmail.com

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ СПУТНИКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ К ИЗУЧЕНИЮ КОСЕЙСМИЧЕСКИХ И ПОСТСЕЙСМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В. О. Михайлов¹, *, В. Б. Смирнов¹, А. М. Конвисар¹, Е. П. Тимошкина¹, С. А. Хайретдинов¹

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

*E-mail: mikh@ifz.ru

Спутниковые радары с синтезированной апертурой (РСА или SAR) позволяют с высокой точностью определять смещения земной поверхности и инфраструктуры за время между повторными съемками (от 5 до 12 дней). Совместный анализ серий радарных снимков позволяет выявлять медленные смещения, происходящие со скоростью в первые миллиметры в год. Эти данные, наряду с данными глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), активно используются для построения моделей поверхности разрыва и изучения постсейсмических процессов, таких как постсейсмический крип и вязкоупругая релаксация напряжений, возникших после землетрясений.

При изучении крупных землетрясений, магнитудой 8 и более также используются косейсмические и постсейсмические гравитационные аномалии, в настоящее время рассчитываемые по ежемесячным моделям спутниковой системы GRACE-FO.

Совместная интерпретация данных спутниковой геодезии и гравиметрии выполняется в рамках геодинамических моделей, построенных, в частности, с использованием решения задачи о напряжениях и деформациях в сферической радиально расслоенной планете, формирующихся в результате смещений на наборе расположенных в ней прямоугольных площадок. Модель строится путем минимизации невязок по полям смещений на земной поверхности, полученным по данным РСА интерферометрии и ГНСС, а также косейсмическим гравитационным аномалиям, полученным по моделям спутников GRACE-FO. В качестве дополнительной информации используются GCMT решения, дающие информацию об ориентации плоскости подвижки и направлении смещений на ней. Для субдукционных землетрясений привлекаются данные о геометрии поверхности погружающейся плиты, для внутриконтинентальных землетрясений – данные о выходе поверхности разрыва на поверхность или о разломах, к которым она может быть приурочена.

В докладе будут рассмотрены некоторые примеры анализа косейсмических данных и построения моделей для ряда недавних землетрясений (Турция – 06.02.2023 г., Аляска – 29.07.2021 г., Китай – 22.01.2024г. и др.). Большой интерес представляет изучение постсейсмических процессов, в частности выявление относительной роли постсейсмического крипа и вязкоупругой релаксации. Важность этой задачи состоит в том, что поля смещений и деформаций для этих процессов существенно различаются, что приводит к различным изменениям напряженного состояния литосферы в областях землетрясений. Для крупных сейсмических событий большую роль в изучении постсейсмических процессов наравне с данными спутниковой радарной интерферометрии и ГНСС играют гравитационные аномалии. В докладе будут рассмотрены результаты исследования постсейсмических процессов в областях недавних крупных землетрясений, приведены результаты численного моделирования процессов вязкоупругой релаксации и постсейсмического крипа.

Получаемые в последние годы результаты демонстрируют все возрастающую роль спутниковых методов в геофизике и геодинамике.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 23-17-00064).

APPLICATION OF MODERN SATELLITE TECHNOLOGIES TO THE STUDY OF COSEISMIC AND POSTSEISMIC PROCESSES

V. O. Mikhailov¹, *, V. B. Smirnov¹, A. M. Konvisar¹, E. P. Timoshkina¹, S. A. Khairatdinov¹

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: mikh@ifz.ru

СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПРОЦЕССОВ В ЗОНЕ ЛЕДНИКОВ ВЫСОТНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ

Н. Н. Михайлова^{1, *}, А. С. Мукамбаев¹

¹Филиал Института геофизических исследований Национального ядерного центра Республики Казахстан, Алматы, Казахстан

*E-mail: mikhailova@kndc.kz

Исследуемая территория Центральной Азии находится на границе трех государств – Казахстана, Кыргызстана, Китая. Здесь расположены масштабные ледники, простирающиеся вдоль хребтов Южного Тянь-Шаня на сотни километров.

Стационарные сети сейсмических станций регистрируют из этой зоны большое количество событий различной природы. Все они являются естественными явлениями, обусловленными процессами в трех взаимодействующих геосферах – литосфере, криосфере, атмосфере. Задачи исследований заключаются в понимании взаимовлияния геосфер, изучении воздействия изменений климата на режим ледниковой сейсмичности, разделении (маркировки) в каталогах землетрясений тектонической природы и ледниковых событий. В настоящее время при оценке сейсмической опасности учитываются все события без разбора, что приводит к ошибочным выводам и прогнозам.

Особый интерес представляет использование в мониторинге сейсмической группы Маканчи (MKAR, первичная станция системы IMS СТВТО). Несмотря на значительную удаленность от ледников (≈ 550 км.), группа ежедневно регистрирует большое количество однотипных по волновым формам событий. Азимуты на источник по *P*- и *S*-волнам, определенные с помощью *F-k* диаграмм, дают стабильные значения в диапазоне 185° – 190° . Эпицентры совпадают с положением ледников. Количество этих событий характеризуется четкими суточными и сезонными вариациями.

Установленные в 2023 г. близкие к леднику полевые станции позволили более точно локализовать регистрируемые события, подтвердить версию, что группа Маканчи действительно регистрирует ледниковые события, установить энергетический порог регистрируемых группой Маканчи источников, ассоциированных с ледником. В настоящее время по данным группы за более чем 20-летний период работы изучаются изменения режима ледниковой сейсмичности, выделены наиболее нестабильные участки ледников, найдены характерные признаки волновых форм разных типов ледовых событий. Для этого используется программное обеспечение РМСС (прогрессивный мультиканальный корреляционный анализ) [1]. Дополнительно будут проанализированы в комплексе данные близкой инфразвуковой станции и далекой инфразвуковой группы (Маканчи).

Эти результаты внесут вклад в изучение изменений климата, распознавание ледниковых событий на записях станций мониторинга, совершенствования каталога землетрясений этой интересной сейсмоактивной зоны.

Литература

1. Cansi Y. An automatic seismic event processing for detection and location: the P.M.C.C. method // Geophys. Res. Lett. 1995. Vol. 22. P. 1021–1024.

BRANCH INSTITUTE OF GEOPHYSICAL RESEARCH OF THE NATIONAL NUCLEAR CENTER OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

N. N. Mikhailova^{1, *}, A. S. Mukambayev¹

¹Branch Institute of Geophysical Research of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan

*E-mail: mikhailova@kndc.kz

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССА СКОЛЬЖЕНИЯ ПО ГЕТЕРОГЕННОМУ МОДЕЛЬНОМУ РАЗЛОМУ

К. Г. Морозова^{1,*}, А. А. Остапчук¹, Д. В. Павлов¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: morozova.kg@idg.ras.ru

Многие деформационные процессы в земной коре представляют собой динамический разрыв или скольжение по уже существующим разломам, трещинам, литологическим границам, сформированным в массиве горных пород. Известно, что на любом иерархическом уровне – от образцов горной породы до крупнейших разломов – в области скольжения выделяются особые зоны локальных контактов неровностей, так называемые, аспериты. Созданная в ИДГ РАН установка для исследования процесса сдвига по контакту между блоками горной породы метрового размера использована для изучения деформационных процессов на разломе с гетерогенной структурой поверхности скольжения, содержащей такие прочные контактные области – аналоги зон аспериты, представляющие собой зоны круглой формы, выполненные из песчано-цементной смеси и имеющие прочный контакт с бортами модельного разлома.

Экспериментальный стенд представляет собой установку двухосного нагружения, состоящую из стальной несущей рамы, гидравлической системы приложения нагрузки и двух контактирующих блоков. Модельный разлом представляет собой контакт шероховатых поверхностей блоков и имеет размер 750 × 120 мм². Деформация модельного разлома сопровождается излучением колебаний, непрерывная регистрация которых велась датчиками акустической эмиссии, которые крепились на верхнюю и нижнюю поверхности блоков. Так же в системе велась регистрация механических параметров – относительное смещение берегов модельного разлома, нормальное и сдвиговое усилие.

Анализ зарегистрированной акустической эмиссии совместно с механическими параметрами системы, такими как смещение и сдвиговое усилие, позволили наблюдать пространственные и временные закономерности развития разрушения аспериты.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 20-77-10087).

SPATIAL PATTERNS OF THE DEVELOPMENT OF THE SLIDING PROCESS ALONG A HETEROGENEOUS MODEL FAULT

K. G. Morozova^{1,*}, A. A. Ostapchuk¹, D. V. Pavlov¹

¹Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: morozova.kg@idg.ras.ru

СВЯЗЬ ОБЛАСТИ ПОВТОРНЫХ ТОЛЧКОВ С РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ПЕРВЫХ АФТЕРШОКОВ В УСЛОВИЯХ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ ХИБИНСКОГО МАССИВА

А. Ю. Моторин^{1,2}, С. В. Баранов¹, *

¹Кольский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Апатиты, Россия

²Кировский филиал акционерного общества «Апатит», Кировск, Россия

*E-mail: bars.vl@gmail.com

Рассматривается связь области, где ожидаются повторные толчки, с пространственным распределением первых афтершоков. Район исследования – апатит-нефелиновые месторождения южной части Хибинского массива (Кольский полуостров), отрабатываемые Кировским филиалом (КФ) АО «Апатит» подземным способом. Разработка месторождений ведется в удароопасных условиях, при которых возникают различные проявления горного давления и природно-техногенная сейсмичность. Исходные данные – каталог сейсмических событий, зарегистрированных сетью сейсмического мониторинга КФ АО «Апатит» с 1996 г. (представительная магнитуда $M_c = 0$, точность определения гипоцентров 25 м [1]). Основные толчки и их афтершоки выделялись методом «ближайшего соседа» [2]. Рассматривались афтершоковые серии, инициированные землетрясениями с магнитудой $M \geq 1.5$, у которых за 0.3 суток в круге радиуса 5 длин разрыва (обучающее множество) произошло не менее 5 представительных событий и имеется хотя бы один афтершок с $M \geq 0.6$ за время 0.3–90 суток (целевые афтершоки). Всего было рассмотрено 85 серий. Мы исходили из того, что пространственное распределение событий из обучающего множества может дать представление об области будущей афтершоковой активности. Было протестировано 123 варианта областей афтершоков, различающихся формой, местоположением и ориентацией, оцениваемым по событиям из обучающего множества. Размер области определялся методом шкалирования по физическим и статистическим характеристикам, рассчитанным как по основному толчку, так и по обучающему множеству. Качество прогнозной области оценивалось по минимуму функции потерь, рассчитанной по диаграмме ошибок [3]. Наилучший результат количественного теста показала область в виде стадиона с центром в основном толчке. (Стадион – геометрическое место точек, расположенных на расстоянии не больше заданного от отрезка прямой, который моделирует проекцию на поверхность Земли предполагаемого «разрыва» очага основного толчка.) Длина стадиона совпадает с длиной разрыва основного толчка (пропорциональна корню кубическому из его энергии), расстояние от разрыва (ширина стадиона) определяется шкалированием по длине трещины, а ориентация – по обучающему множеству. Эта область имеет простую интерпретацию – афтершоки происходят на некотором удалении от разрыва очага основного толчка. Дополнительно, с помощью анализа диаграммы ошибок, рассчитанной для оптимальной области, были получены практические рекомендации по оценке области афтершоковой активности по данным оперативной обработки.

Литература

1. Корчак П. А., Жукова С. А., Меньшиков П. Ю. Становление и развитие системы мониторинга сейсмических процессов в зоне производственной деятельности АО «Апатит» // Горный журнал. 2014. № 10. С. 42–46.
2. Zaliapin I., Ben-Zion, Y. A global classification and characterization of earthquake clusters // Geophys. J. Int. 2016. Vol. 207. P. 608–634.
3. Molchan G. Space–Time Earthquake Prediction: The Error Diagrams // Pure and Applied Geophysics. 2008. Т. 167. Space–Time Earthquake Prediction.

RELATIONSHIP BETWEEN THE AREA OF AFTERSHOCKS AND THE DISTRIBUTION OF INITIAL AFTERSHOCKS UNDER CONDITIONS OF INDUCED SEISMICITY OF THE Khibiny MASSIF

A. Motorin^{1,2}, S. Baranov¹, *

¹Kola Branch of the Federal Research Center «Unified Geophysical Service of Russian Academy of Sciences», Apatity, Russia

²Kirovsk branch of the joint stock company «Apatit», Kirovsk, Russia

*E-mail: bars.vl@gmail.com

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФИЛЬТРАЦИИ И СОЗДАНИЯ СЕТИ ТРЕХМЕРНЫХ ТРЕЩИН В ГОРНЫХ ПОРОДАХ СО СЛОЖНЫМ МИНЕРАЛЬНЫМ СОСТАВОМ НА МАСШТАБАХ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА

В. А. Начев^{1, *}, С. Б. Турунтаев¹

¹*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия*

**E- mail: nachev@phystech.edu*

Несмотря на то, что гидроразрыв пласта массово применяется для интенсификации добычи углеводородов уже много лет, до сих пор остаются актуальными отдельные вопросы инициации и развития трещины гидроразрыва. На данный момент в подавляющем большинстве случаев модели, использующиеся для оптимизации дизайна гидроразрыва, базируются на понятии о магистральной трещине. Существующие на сегодняшний день подходы позволяют достаточно уверенно говорить о геометрии магистральной трещины гидроразрыва, ее траектории, ветвлении и раскрытии. Однако представление о трещине гидроразрыва как о магистральной трещине иногда ставится под сомнение. Ряд современных работ показывает ограниченность применимости модели магистральной трещины для описания гидроразрыва в породах со сложным внутренним строением. Это связано с тем, что довольно сложно выделить конкретную магистральную трещину из системы образованных при гидроразрыве трещин, наблюдающихся на керновом материале, по данным детальных исследований профиля притока, по данным распределенных акустических температурных приемников, помещенных в скважину с проводящимся гидроразрывом. При гидроразрыве создается не одна магистральная трещина, а значительное количество трещин, часть из которых могут играть минимальную роль в интенсификации добычи, поскольку закрываются после завершения воздействия. Естественным образом ставится задача создания максимально разветвленной системы раскрытых трещин при проведении гидроразрыва: именно такая система является предпочтительной при разработке нетрадиционных низкопроницаемых коллекторов, доля которых в разработке увеличивается в течение последних лет. Тем не менее, существующие на сегодняшний момент модели распространения систем трещин в неоднородных средах обладают рядом ограничений и не всегда могут быть напрямую подтверждены экспериментальными и полевыми данными, то есть не могут быть в полной мере использованы для решения задачи проведения гидроразрыва с параметрами, допускающими максимальную разветвленность образующейся системы трещин. В данной работе для изучения процессов распространения и ветвления трещин и определения оптимальных условий воздействия на коллектор в исследуемых породах была проведена серия лабораторных экспериментов, на основании которых подготовлены микромасштабные цифровые модели образцов пород, описывающих структуру, гранулированный состав и пространственное распределение механических свойств. В результате работы была построена трехмерная упругопластическая неоднородная минеральная модель на основании результатов 2D-минералогического картографирования поверхности и рентгеновской микротомографии. Было изучено возникновение и распространение трехмерных трещин с учетом гранулированного состава и сложной структуры упругопластических образцов горных пород. По результатам проведенного численного моделирования и пересчета полученных условий нагружения в давление закачиваемой жидкости ГРП инженеры-геомеханики смогут выбрать необходимые условия, которые обеспечат напряженно-деформированные состояния, приводящие к наибольшей степени трещиноватости пласта, и увеличат зону дренажа.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900167-1).

PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODELING OF THE FILTRATION PROCESSES AND THE PRODUCING THE NETWORK OF 3D FRACTURES IN RESERVOIR ROCKS WITH COMPLEX MINERAL COMPOSITION AT THE PORE SCALE

V. A. Nachev^{1,*}, S. B. Turuntaev¹

¹*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**E- mail: nachev@phystech.edu*

МЕТОД ОЦЕНКИ ОТДАЛЁННЫХ НЕГАТИВНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ И ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ

М. Ю. Николаев¹*, С. Б. Турунтаев¹, Н. А. Барышников¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: m.nikolaev@idg.ras.ru

Долгосрочная разработка месторождений углеводородов и геотермальной энергии может привести к возникновению негативных сейсмических последствий в отдалённой временной перспективе. Анализ вероятности и механизма возникновения таких последствий необходим для повышения безопасности эксплуатации месторождений. Основной причиной техногенной сейсмичности, возникающей при разработке месторождений нефти и газа и геотермальной энергии, является закачка флюидов. В настоящее время для реагирования на индуцированную закачкой сейсмичность активно используется система светофора, представляющая собой протокол принятия решений об остановке или продолжении закачки флюидов при возникновении сейсмических событий. Для выделения и анализа отдалённых негативных сейсмических последствий предложен метод на основе расширения возможностей системы светофора, названный методом многокритериального анализа. В основе предложенного метода лежит принцип системного подхода, базового элемента системного анализа, активно применяющегося для решения задач, связанных с анализом функционирования сложных геолого-геофизических и инженерно-технических систем. Разработка метода началась с построения функциональной блок-схемы сложной инженерно-геофизической системы месторождений в нотации IDEF0 (Integration Definition for Function Modeling – интегрированное определение для функционального моделирования) для уточнения входных и выходных параметров. Проведён анализ типового рабочего процесса системы светофора как протокола принятия решений в режиме реального времени. Предложены критерии роста сейсмической опасности в отдалённой временной перспективе. Представлена процессная модель многокритериального анализа, включающая в себя блок оценки негативных сейсмических последствий для реагирования на них и блок численного моделирования на основе машинного обучения для их прогнозирования.

Предполагается, что использование предложенной процессной модели позволит прогнозировать возникновение отдалённых негативных сейсмических событий, а точность прогноза будет поддерживаться путём регулярного сравнения результатов численного моделирования с реальными данными.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900167-1).

METHOD FOR ASSESSING REMOTE NEGATIVE SEISMIC CONSEQUENCES OF HYDROCARBON AND GEOTHERMAL ENERGY FIELDS DEVELOPMENT

M. Y. Nikolaev¹*, S. B. Turuntaev¹, N. A. Baryshnikov¹

¹Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: m.nikolaev@idg.ras.ru

ВОЗМОЖНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ СИЛЬНЫМИ ВАРИАЦИЯМИ ПАРАМЕТРОВ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

В. А. Новиков^{1, 2, *}, В. М. Сорокин³

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт высоких температур РАН, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, Москва, Россия

*E-mail: novikov@ihed.ras.ru

Выполненные ранее численные исследования влияния солнечных вспышек класса X на сейсмическую активность [1] показали, что поглощение рентгеновского излучения солнечной вспышки в ионосфере может вызвать пульсации геомагнитного поля до 100 нТ и соответствующую генерацию геомагнитно-индуцированных токов в разломах земной коры с плотностью до 10^{-6} А/м², сопоставимой с плотностью тока, создаваемого в земной коре искусственными импульсными источниками, которые в свою очередь приводили к инициированию слабых землетрясений на Памире и Северном Тянь-Шане [2]. Для проверки данных результатов проведен анализ воздействия 50 сильнейших вспышек класса X (1997–2023 гг.) на глобальную сейсмическую активность, а также на зоны подготовки землетрясений, расположенные на освещенной части земного шара. Методом наложения эпох установлено повышение количества землетрясений $M \geq 4.5$ в течение 10 суток после солнечной вспышки, особенно в области с радиусом 5000 км вокруг подсолнечной точки (до 38%), по сравнению с аналогичным периодом до неё. Анализ афтершоковой активности сильного Суматра-Андаманского землетрясения ($M = 9.1$, 26.12.2004 г.) после солнечной вспышки класса X7.2 (20.01.2005 г.) показал, что количество афтершоков с магнитудой $M \geq 2.5$ возросло более, чем в 20 раз после солнечной вспышки с задержкой 7 суток. Солнечные вспышки класса X и M, произошедшие после Дарфилдского землетрясения ($M = 7.1$, 04.09.2010 г., Новая Зеландия), в зоне которых находилась афтершоковая зона, вероятно, вызвали два сильных афтершока ($M > 6$) с одной и той же задержкой 6 суток на разломе Port Hills, который является наиболее чувствительным к внешнему электромагнитному воздействию с точки зрения его электропроводности и ориентации. На основе полученных результатов обсуждается возможность их использования в качестве дополнительной информации наряду с известными предвестниками для краткосрочного прогноза землетрясений.

Исследования выполнены в рамках государственных заданий Министерства науки и высшего образования РФ (ОИВТ РАН – № 075-00270-24-00, ИДГ РАН – № 122032900167-1, ИЗМИ РАН – № 1021060808637-6-1.3.8).

Литература

1. Sorokin V., Yaschenko A., Mushkarev G., Novikov V. // Atmosphere. 2023. Vol. 14 (3) P. 458.
2. Зейгарник В.А., Богомолов Л.И., Новиков В.А. Электромагнитное инициирование землетрясений: Полевые наблюдения, лабораторные эксперименты и физические механизмы (Обзор) // Физика Земли. 2022. № 1. С. 35–66.

POSSIBLE TRIGGERING OF EARTHQUAKES BY STRONG VARIATIONS OF SPACE WEATHER PARAMETERS

V. A. Novikov^{1, 2, *}, V. M. Sorokin³

¹Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Sadovsky Institute of geosphere dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: novikov@ihed.ras.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОБЛАКА МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ ЗАКАЧКИ ЖИДКОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАЗЫ ДАННЫХ ЦИФРОВЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Е. В. Новикова¹ *, Н. А. Барышников¹, М. А. Тримонова¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук

*E-mail: helenvn97@gmail.com

Процесс разработки месторождений углеводородов может сопровождаться возникновением индуцированной сейсмичности [1, 2]. Данный эффект связан с возникновением области повышенного порового давления в прискважинной зоне в связи с закачкой флюида в пласт горных пород. Условием инициирования сейсмогенерирующей подвижки в таком случае считается достижение поровым давлением жидкости некоторой критической величины, значение которой зависит от величин главных сжимающих напряжений и ориентации естественных трещин в пласте. Ранее в ряде работ была показана возможность использования данных о распространении облака микросейсмических событий для оценки проницаемости однородной и анизотропной среды [2]. Возможность решения обратной задачи – определения локальной проницаемости неоднородной пористой среды по данным об изменении микросейсмической активности – была экспериментально продемонстрирована в ходе нашей предыдущей работы [3]. В рамках данной работы была создана методика быстрого моделирования распространения облака микросейсмических событий, возникающих в результате закачки жидкости в неоднородный коллектор. В качестве критерия определения величины критического порового давления использовался критерий Кулона-Мора для эффективных напряжений на площадке, ориентированной в соответствии с ориентацией естественной трещиноватости. С помощью разработанной методики было проведено численное моделирование распространения облака микросейсмических событий на масштабной выборке цифровых геологических моделей неоднородной среды с различной структурой и набором типов пород [4]. Показано существенное влияние неоднородности фильтрационных свойств как на динамику распространения облака микросейсмических событий, так и на их пространственное распределение. Представленный подход позволяет проводить достаточно детальное и физически обоснованное моделирование распространения облака микросейсмических событий при закачке жидкости в неоднородную среду. Результаты подобного моделирования могут быть использованы для создания метода машинного обучения для восстановления фильтрационных свойств неоднородного коллектора по данным микросейсмического мониторинга.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900167-1).

Литература

1. Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенная сейсмичность – индуцированная и триггерная. М. : ИДГ РАН. 2015. – 364 с.
2. Shapiro S. Fluid-Induced Seismicity // Cambridge: Cambridge University Press. 2015.
3. Turuntaev S., Eremeeva E., Zenchenko E. Laboratory study of microseismicity spreading due to pore pressure change // J. Seismol. 2013. Vol. 17.
4. Jessell M. et al. Into the Noddyverse: a massive data store of 3D geological models for machine learning and inversion applications // Earth Syst Sci Data. 2022. Vol. 14 (1). P. 381–392.

NUMERICAL SIMULATION OF THE PROPAGATION OF MICROSEISMIC EVENTS AS A RESULT OF FLUID INJECTION USING A DATABASE OF DIGITAL GEOLOGICAL MODELS

E. V. Novikova¹ *, N. A. Baryshnikov¹, M. T. Trimonova¹

¹Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: helenvn97@gmail.com

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ РЕКОНСТРУКЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В КОНЦЕПЦИИ КРИТИЧЕСКИ НАПРЯЖЕННЫХ ТРЕЩИН

Е. В. Новикова^{1, 3, *}, Н. В. Дубиня^{2, 3}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: helenvn97@gmail.com

Исследование посвящено проблеме оценки напряжений в геологической среде на основании анализа естественной трещиноватости в рамках решения обратной задачи. Концепция критически напряженных трещин ранее использовалась для оценки напряжений на реальных данных, однако детальное понимание различных аспектов решения обратной задачи, в том числе, существования, единственности и устойчивости решения, остается под вопросом из-за ограниченного количества наборов реальных данных, которые использовались для реконструкции напряжений. Настоящее исследование направлено на преодоление этой проблемы путем внедрения алгоритма генерации синтетических данных о естественной трещиноватости, максимально приближенных к реальности. Процедура оценки напряжений была применена к синтезированным естественным трещинам с целью анализа особенностей обратной задачи, а именно: существования, единственности и устойчивости решения; требований к объему и разнообразию входных данных; предпочтительных методов решения, обеспечивающих наилучшие результаты при минимальных затратах вычислительных мощностей. Было доказано, что моделирование методом Монте-Карло позволяет получить информацию о природных напряжениях и прочностных свойствах массива горных пород на основе анализа естественной трещиноватости с помощью статистического подхода. Пять параметров тензора природных напряжений (три главных оси тензора напряжений, коэффициент Лодэ–Надаи и отношение между максимальным и минимальным главными напряжениями) и одно прочностное свойство геологической среды (коэффициент трения) были получены как случайные величины. Четыре момента распределений этих параметров (среднее, дисперсия, асимметрия и эксцесс) были рассчитаны для множества решений обратной задачи с допустимыми соответствиями между расчетной и исходной классификациями критически напряженных трещин. Таким образом, анализировалась достоверность решения обратной задачи по отношению к исходным данным. Полученные результаты могут быть использованы для задания корректных параметров процедуры решения обратной задачи оценки природных напряжений на основании анализа критически напряженных естественных трещин сдвига.

STATISTICAL ANALYSIS OF THE STRESS RECONSTRUCTION INVERSE PROBLEM IN THE CONCEPT OF CRITICALLY STRESSED FRACTURES

E. V. Novikova^{1, 3, *}, N. V. Dubinya^{2, 3}

¹Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russia

³Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: helenvn97@gmail.com

КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОГЕННОЙ НАРУШЕННОСТИ МАССИВА ПОРОД И ПРОНИКНОВЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ

В. Н. Одинцев^{1, *}, Н. А. Милетенко¹, Е. В. Федоров¹, Ф. С. Белоусов¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: Odin-VN@yandex.ru

При разработке месторождений твердых полезных ископаемых иногда происходят катастрофы, связанные с проникновением подземных вод в горные выработки. Это обусловлено рядом причин, в частности, неадекватным прогнозом гидрогеологических условий разработки месторождения, который осуществлялся без учета техногенного изменения напряженно-деформированного состояния и нарушенности массива пород под влиянием выемки ископаемого. Мы предлагаем новый подход к моделированию проникновения воды в выработки, основанный на кластерном анализе локальных разрушений массива пород и теории перколяции.

Под кластерным анализом техногенной нарушенности понимаем процедуру группировки измененных (нарушенных) природных контактов блоков в трещиновато-блочном массиве пород. Нарушение контакта ведет к увеличению его проницаемости и изменению условий просачивания воды через контакт. Математически кластерный анализ заключается в определении вероятностной конфигурации совокупности нарушенных контактов в пространстве и особенно условий образования сквозного (перколяционного) кластера, простирающегося в массиве от его границы, выходящей на источник воды, до обнажения пород в выработке. Образование сквозного кластера является триггером перехода к режиму интенсивного просачивания воды через массив пород.

Считаем, что нарушение контактов блоков определяется двумя факторами: (1) детерминированным (усредненным) напряженно-деформированным состоянием (НДС) соответствующей подобласти массива пород; (2) случайным фактором в масштабе подобласти. Условная прочность этой подобласти и представительное напряжение Мизеса считаются случайными величинами с известными параметрами нормальных распределений. Для каждой подобласти определяется свое значение вероятности разрушения контактов блоков и в рамках теории перколяции строятся возможные картины кластеров нарушенности с оценкой условий образования сквозного кластера. По совокупности результатов исследований для каждой подобласти составляются возможные интегральные картины нарушенности всего массива и выявляются особенности формирования интегрального сквозного кластера.

Разработанная методология использовалась при моделировании условий катастрофического проникновения поверхностных вод через нетронутую часть массива пород (целик), разделяющую дно карьера, частично заполненного водой, и подземные горные выработки на алмазодобывающем руднике Мир (Якутия). Сначала методом конечных элементов проведены расчеты напряжений и деформаций разделительного целика. Результаты расчетов учитывались при построении кластеров нарушенных элементов в малых подобластях целика и интегрального кластера наведенной нарушенности во всем разделительном целике.

Проведено несколько расчетов НДС и построений конфигурации интегрального кластера при разных значениях геомеханических параметров. Было подтверждено заключение о том, что напряженно-деформированное состояние разделительного целика в предкатастрофном состоянии было вполне удовлетворительным по фактору прочности и деформациям сдвига. Однако оказалось, что вероятностные картины наведенной нарушенности и, следовательно, областей техногенной инфильтрации были существенно различными. Некоторые конфигурации были опасными по фактору проникновения воды. Кроме того, было установлено, что малое изменение внешних условий может существенно влиять на конфигурацию увеличивающегося кластера нарушенности и привести к внезапному образованию сквозного кластера, простирающегося от заполненного водой дна карьера до кровли подземной выработки. По-видимому, образование такого кластера на практике явилось главной причиной резкого увеличения интенсивности просачивания воды в целике, что вызвало в

конечном счете кардинальное изменение гидрогеологической обстановки на руднике. Выводы моделирования соответствуют результатам проведенных ранее натурных исследований нарушенности массива по изменению скорости упругих волн и реально зафиксированной конфигурации области проникновения воды в подземное пространство, что подтверждает адекватность нашего подхода в прогнозе гидрогеологических условий разработки месторождения.

CLUSTER ANALYSIS OF TECHNOGENIC DISTURBANCE OF THE ROCK MASS AND PENETRATION OF SURFACE WATER INTO UNDERGROUND MINE WORKINGS

V. N. Odintsev^{1,*}, N. A. Miletenko¹, E. V. Fedorov¹, F. S. Belousov¹

¹Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: Odin-VN@yandex.ru*

СЕЙСМОГЕННАЯ СТРУКТУРА ЗОН ФОРМИРОВАНИЯ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

А. А. Остапчук^{1, *}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: ostapchuk.aa@idg.ras.ru

Крупные землетрясения инициируются в зонах тектонических разломов. Тектонические разломы характеризуются пространственной неоднородностью структурных и реологических свойств, и неоднородность плоскости скольжения разломов оказывает определяющее влияние на динамику распространения разрыва и инициирование сильных землетрясений. Создание реалистичных моделей современных зон формирования очагов крупных землетрясений и асейсмического скольжения долгое время было затруднено из-за низкой разрешающей способности сейсмических данных.

В настоящей работе представлен новый метод анализа сейсмичности, направленный на выявление структурных особенностей плоскости скольжения разломов. В основе метода лежит алгоритм топологической фильтрации. Беря во внимание следующие условия: i) берега разломов характеризуются волнистостью, ii) в плоскости разлома формируются отдельные зоны со свойством скоростного разупрочнения и скоростного упрочнения; применение алгоритма топологической фильтрации позволяет во множестве сейсмических событий выделить плотные кластеры. Области локализации плотных кластеров интерпретируются как сейсмогенные пятна со свойством скоростного разупрочнения.

Сейсмический каталог Северной Калифорнии был использован для изучения структур 11 сегментов разломов Сан-Андреас, Калаверас и Хейворд. Суммарная длина всех сегментов составляет около 500 км. Все выбранные сегменты относятся к субвертикальным разломам. Проекция гипоцентров землетрясений на плоскость разлома показывает сильную неоднородность. В плоскостях разломов можно обнаружить топологически плотные кластеры (сейсмогенные пятна). Сейсмогенные пятна занимают около 10–20% площади скольжения разлома. Именно в окрестности сейсмогенных пятен инициируются землетрясения магнитудой более 5. Статистическое самоподобие структуры сейсмогенных пятен проявляется на масштабах менее 1 км.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 20-77-10087).

THE SEISMOGENIC STRUCTURE OF THE ZONES OF STRONG EARTHQUAKE NUCLEATION

A. A. Ostapchuk^{1, *}

¹Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: ostapchuk.aa@idg.ras.ru

АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ ТЕЛ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

А. А. Остапчук¹, И. И. Зайруллин^{1, *}

¹*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия*

**E-mail: zairullin@mail.ru*

Сейсморазведка отличается широкой площадью исследований, высокой разрешающей способностью, технологичностью и большим объемом получаемой информации, и необходимостью значительного объема вычислительных ресурсов. Однако при анализе сейсмической информации регулярно возникают скрытые факторы, которые негативно влияют на интерпретацию данных сейсморазведки и получение точной структурной модели разрабатываемого участка. Геофизические исследования скважин более точны, но пространственно ограничены околоскважинным пространством. Учитывая большую площадь исследований, только скважинных данных может быть недостаточно, а различные геологические аномалии, которые не пересекла скважина, могут повлиять на прогнозирование глубин расположения целевых пластов в других точках площади лицензионного участка. Ошибки прогноза местоположения целевых пластов могут достигать от 30 до 50 метров.

В то же время увязка сейсмических и скважинных данных на основе вертикального сейсмического профилирования (ВСП) позволяет получить сейсмические паттерны геологических аномалий. ВСП - это разновидность сейсморазведки в масштабе одной скважины, при проведении которой один из двух элементов (источник или приёмник сейсмических волн) располагается на поверхности, а другой элемент помещается в пробурённую скважину.

В настоящей работе предложен метод анализа срезов сейсмического 3D куба, основанный на нейросетевых алгоритмах обучения с учителем. Обучение нейронной сети осуществляется на основе сейсмических паттернов геологических аномалий, установленных в локальных точках в ходе выполнения ВСП. Обученный алгоритм нейронной сети позволяет выявить наличие и геометрию аномальных тел на масштабах всего лицензионного участка для последующей корректировки прогнозов.

COMPUTER VISION APPROACH TO DETECT ANOMALOUS GEOLOGICAL FORMATIONS ON SEISMIC DATA

A. A. Ostapchuk¹, I. I. Zairullin^{1, *}

¹*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**E-mail: zairullin@mail.ru*

АНОМАЛЬНО ВЫСОКИЕ ПИКОВЫЕ УСКОРЕНИЯ КАК СЛЕДСТВИЕ ЭФФЕКТОВ НАПРАВЛЕННОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ОЧАГОВ КРУПНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

О. В. Павленко^{1, *}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли имени О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: olga@ifz.ru

В приразломных зонах землетрясений с относительно небольшими очагами ($M_w \sim 6.5-7.0$) обычно наблюдается нелинейное поведение мягких грунтов и падение модулей сдвига в грунтовых слоях при сильных движениях; ускорения на поверхности не превышают ~ 1 g, и высокие ускорения связаны с нелинейностью жесткого типа, когда нелинейная зависимость напряжение-деформация отклоняется в сторону напряжений при больших деформациях. Примеры – японские землетрясения 1995 г. в Кобе, 2000 г. в Тоттори.

При более сильных землетрясениях с протяженными очагами (более $\sim 120-150$ км) часто регистрируются аномально высокие ускорения, превышающие 1 g, основной причиной которых являются эффекты направленности излучения очагов. Известно, что распространение трещин в очагах сильных землетрясений на протяженных однородных и достаточно гладких участках, где трещина может разогнаться до больших скоростей, может сопровождаться генерацией ударных фронтов или конусов Маха (предельный случай проявления эффектов направленности), которые на поверхности проявляются в виде областей с высокими ускорениями. При таких землетрясениях наблюдаются движения грунта, разрушительные для сооружений, так называемые «импульсные волновые формы», и такие эффекты могут не затухать с ростом эпицентральных расстояний.

При таких землетрясениях не наблюдается широкого распространения нелинейности поведения мягких грунтов в приразломных зонах; на многих станциях, удаленных от эпицентра, мягкие грунты испытывают упрочнение. На таких станциях, зарегистрировавших аномально высокие $PGA > 1$ g, модули сдвига в грунтовых слоях возрастали с началом сильных движений и достигали максимумов в моменты наибольшей интенсивности сильных движений, затем снижались.

Эффекты направленности излучения очагов рассмотрены на примере японских землетрясений 2003 г. Токачи-оки ($M_w \sim 8.3$), 2011 г. Тохоку ($M_w \sim 9.0$), 2024 г. Ното ($M_w \sim 7.5$), турецких землетрясений 2023 г. ($M_w \sim 7.6-7.8$); такие эффекты могли иметь место при Нефтегорском землетрясении 1995 г. на Сахалине.

ABNORMALLY HIGH PEAK GROUND ACCELERATIONS AS A RESULT OF RADIATION DIRECTIVITY EFFECTS OF LARGE EARTHQUAKE FOCI

O. V. Pavlenko^{1, *}

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: olga@ifz.ru

ЭФФЕКТ АЗИМУТАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ОТКЛИКА ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ В ПРИРАЗЛОМНОЙ ЗОНЕ НА ПРОХОЖДЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ОТ УДАЛЕННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

И. А. Пантелеев^{1, *}, В. Ляховский², Э. Шалев²

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

²Геофизическая служба Израиля, Иерусалим, Израиль

*E-mail: pia@icmm.ru

Авторами работы впервые предложено теоретическое объяснение эффекта азимутальной зависимости отклика порового давления в приразломной зоне на прохождение сейсмических волн от сильных удаленных землетрясений. В основе разработанной теоретической модели, объясняющей природу этого эффекта, лежит явление анизотропии пороупругих свойств, индуцированной микротрещиноватостью породы, преимущественная ориентация которой, в свою очередь, определяется кинематикой активной разломной зоны. Предложено обобщение уравнения Скемптона для недренированного состояния трещиноватой породы, определяющего связь порового давления флюида с величиной ее объемной и сдвиговой деформации, на случай зависимости коэффициентов уравнения от компонент тензора поврежденности второго ранга. Введение тензора поврежденности, с одной стороны, позволяет описать преимущественную ориентацию трещиноватости породы, и индуцированную ей анизотропию механических свойств. С другой стороны, позволяет напрямую связать величину изменения порового давления, вызванного прохождением сейсмических волн, с их азимутом.

В результате проведенных численных экспериментов показано, что все возможные сценарии отклика порового давления флюида в районе активной разломной зоны на прохождение сейсмических волн, определяются взаимной ориентацией сдвиговой разломной зоны, микротрещиноватости в ее окрестности и осей максимального и минимального горизонтальных напряжений, действующих в горном массиве.

Для верификации предложенной теоретической модели использованы комплексные данные скважинного мониторинга резервуара сброса сточных вод Арбакл (Оклахома, США) (*Arbuckle wastewater disposal reservoir, Oklahoma, USA*), реализуемого Американской геофизической службой. Показано, что наблюдаемое разнообразие отклика порового давления в скважинах, расположенных в окрестностях разломной зоны, пересекающей резервуар, на прохождение сейсмических волн от разноудаленных сейсмических событий с высокой точностью описывается разработанной моделью.

Работы выполнены при финансовой поддержке РФФ (проект № 19-77-30008).

THE EFFECT OF THE AZIMUTHAL DEPENDENCE OF THE PORE PRESSURE RESPONSE IN THE NEAR FAULT ZONE ON THE PASSAGE OF SEISMIC WAVES FROM DISTANT EARTHQUAKES

V. Panteleev^{1, *}, V. Lyakhovsky², E. Shalev²

¹*Institute of continuous media mechanics UB RAS, Perm, Russia*

²*Geological Survey of Israel, Jerusalem, Israel*

*E-mail: pia@icmm.ru

О МЕТОДАХ ЛОКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ЛАБОРАТОРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

А. В. Патонин¹, Н. М. Шихова¹, В. Б. Смирнов^{1, 2}, А. В. Пономарев^{1, *}

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

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

*E-mail: avp@ifz.ru

С использованием компьютерного моделирования проведён сравнительный анализ эффективности нескольких методов определения координат акустических событий с использованием перебора по координатной сетке. Получены статистические оценки погрешностей, возникающих при наличии различного рода ошибок (ошибка определения момента прихода упругой волны на датчик, ошибка расчёта скоростей). На синтезированных модельных данных рассматриваются методы поиска минимума функционала, основанные на определении разностей расчётных и экспериментальных времен прихода волны на датчики. Для оценки влияния ошибок на точность определения координат промоделированы различные варианты распределений погрешностей по моментам прихода, положения источников, и различной скорости распространения упругой волны (рассматривается случай изотропной среды с постоянной скоростью распространения волны во всех направлениях).

Рассмотренные методы определения гипоцентров разделяются на две группы по принципу нахождения функции остатка. К первой группе относятся методы, базирующиеся на определении времени в очаге с дальнейшим поиском координаты источника. Методы второй группы используют алгоритм, позволяющий исключить из расчетов само время в источнике и перейти от пространства четырёх неизвестных параметров (координаты и время в очаге) к поиску только координат. Для каждого метода расчёта построены распределения отклонений найденных гипоцентров от задаваемых изначально координат источников. Вычислены статистические характеристики отклонений координат с использованием каждого метода. Проведена оценка погрешности определения времени в источнике.

Исследовано влияние на точность локации больших ошибок вступления на отдельные датчики вследствие пропуска первого вступления или опережения истинного момента прихода волны за счёт возможной помехи.

В результате анализа выявлено, что погрешности всех методов в случае небольшой величины ошибки на всех датчиках дают сходные статистические оценки точности. Метод перебора максимально возможного количества датчиков дает более стабильный результат (в большинстве вариантов распределений ошибок погрешность локации этим методом минимальна). При этом время расчёта координат рассматриваемыми методами примерно одинаковое, но метод перебора позволяет увеличить скорость счёта путем перебора по сетке с уменьшающимся размером ячейки, что служит преимуществом при анализе большого числа событий. Показано, что погрешность локации возрастает по мере удаления истинных координат от центра образца к его краям. Для корректного выбора того или иного метода расчета координат требуется апробация на реальных экспериментах и на специально поставленном лабораторном эксперименте с известным расположением источников сигналов акустической эмиссии.

*Исследования выполнены в рамках государственных заданий ИФЗ РАН
и физического факультета МГУ с использованием оборудования ЦКП ИФЗ РАН.*

ON METHODS FOR SOURCES LOCATION OF ACOUSTIC EMISSION IN A LABORATORY EXPERIMENT

A. V. Patonin¹, N. M. Shikhova¹, V. B. Smirnov^{1, 2}, A. V. Ponomarev^{1, *}

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Lomonosov Moscow State University, physical faculty, Moscow, Russia

*E-mail: avp@ifz.ru

АНОМАЛИИ ПАРАМЕТРОВ *RTL* И *B-VALUE* ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ КАЛИФОРНИИ

А. А. Петрушов¹*, В. Б. Смирнов¹

¹ФГБОУ ВО Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

*E-mail: petrushov.aa18@physics.msu.ru

Аномалии сейсмического режима – характерные изменения распределения землетрясений в пространственно-временной области и их энергетического спектра. Для поиска аномалий перед сильными землетрясениями анализируются параметры сейсмического режима, каждому из которых соответствует образ предвестника — определенный вид поведения значений во времени, сопровождающий процесс подготовки очага землетрясения. В работе проводится исследование аномалий сейсмического режима перед 15 наиболее сильными землетрясениями Калифорнии (с магнитудами $M > 6.5$) за период с 1984 по 2023 гг. Используются два параметра сейсмичности: функция *RTL*, чувствительная к стадиям сейсмического затишья и форшоковой активизации, и параметр *b-value* (наклон графика повторяемости), отражающий соотношение количества землетрясений разных энергий. Данные статистические параметры использовались авторами ранее для поиска и анализа аномалий сейсмического режима в зонах субдукции (Камчатка, Япония) и в рифтовой зоне (Исландия) [1]. Для каждого из параметров построены пространственные карты значений в момент наибольшего проявления аномалии, и временные графики в точке, соответствующей центру пятна аномалии. Определены характеристики аномалий: длительность, пространственный размер, удаленность от эпицентра землетрясения. Представлены значения настроечных параметров алгоритмов, используемых для анализа каждого землетрясения. Длительности выявленных аномалий соответствуют типичным значениям для среднесрочных предвестниковых аномалий [4, 5]. Средняя длительность аномалий *RTL* и *b-value* в Калифорнии меньше длительностей таких аномалий в зоне субдукции на Камчатке [1]. При сравнении длительностей аномалий *RTL* в Калифорнии, Японии и на Камчатке авторами получены соотношения, согласующиеся с работой [2]. Обнаружено, что для 12 из 15 землетрясений аномалии параметра *RTL* регистрируются раньше, чем аномалии наклона графика повторяемости. Полученная очередность возникновения аномалий отличается от очередности, зарегистрированной авторами ранее при анализе сильных землетрясений в зонах субдукции и рифтовой зоне [1]. Это может быть связано как с различием глубин землетрясений в Калифорнии и в зонах субдукции, так и с различием процессов подготовки землетрясений в зонах с разными тектоническими типами [2]. Большинство исследованных землетрясений происходит с задержкой после завершения аномалии *RTL*. Природа этой задержки остается неясной, а время возникновения землетрясения в такой ситуации связывают, в частности, с триггерными механизмами [3, 5]. Анализ аномалий геофизических полей может способствовать прояснению вопроса о причинах таких задержек. Для пяти из исследованных землетрясений пространственные пятна аномалий *b* и *RTL* не перекрываются между собой. Несовпадение пространственных областей проявления аномалий отмечалось ранее в работе [1].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 23–27-00067).

Литература

1. Смирнов В.Б., Петрушов А.А. Стадийность проявления аномалий сейсмического режима перед землетрясениями Камчатки, Японии и Исландии // Физика Земли. 2023. № 5. С. 62–78.
2. Соболев Г.А. Применение алгоритма *RTL* для анализа стадий подготовки сильных землетрясений Калифорнии // Физика Земли. 2003. № 2. С. 3–13.
3. Соболев Г.А. Методология, результаты и проблемы прогноза землетрясений // Вестник РАН. 2015. Т. 85, № 3. С. 203–208.
4. Соболев Г.А. Физические основы прогноза землетрясений. М. : Наука. 1993. – 314 с.
5. Соболев Г.А. Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии. М. : ИФЗ РАН. 2011. – 56 с.

ANOMALIES OF *RTL* AND *B-VALUE* PARAMETERS BEFORE STRONG EARTHQUAKES IN CALIFORNIA

А. А. Petrushov¹*, V. B. Smirnov¹

¹M. V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, Russia

*E-mail: petrushov.aa18@physics.msu.ru

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ УНЧ ОТКЛИК ОКОЛОЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА НА ГРОЗЫ И ПРОМЫШЛЕННУЮ АКТИВНОСТЬ

В. А. Пилипенко^{1, *}, Д. Д. Позднякова¹

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

*E-mail: pilipenko_va@mail.ru

Плазменное окружение Земли играет роль своеобразного «камертона», реагирующего на природные и техногенные возмущения. Особенно эффективно электромагнитное взаимодействие между атмосферой и верхней ионосферой проявляется в частотном диапазоне ионосферного альвеновского резонатора (ИАР) при воздействии как «снизу», так и «сверху». Построение картины такого взаимодействия в ультра-низкочастотном (УНЧ) диапазоне (частоты от долей Гц до десятков Гц) потребовало решения большого числа взаимосвязанных задач. Начат анализ синхронных спутниковых и наземных электромагнитных наблюдений с использованием данных мировой сети индукционных магнитометров и низкоорбитальных спутников. Дана интерпретация механизму появления многополосной спектральной структуры электромагнитных шумов в ночные часы под воздействием поля грозовых разрядов. Рассмотрен отклик ионосферного магнитозвукового волновода и ИАР на различные магнитосферные и атмосферные воздействия. Анализ электромагнитных УНЧ шумов и вариаций параметров плазмы над тайфунами выявил появление «геомагнитной ряби». Для интерпретации экспериментальных результатов разработан ряд новых численных моделей взаимодействия атмосферы и ионосферы. Моделирование взаимодействия ионно-циклотронных волн с системой ионосфера – атмосфера – Земля проведено численным решением связанных волновых уравнений в реальной ионосфере. Рассчитано распространение УНЧ импульсов от атмосферного разряда в верхнюю ионосферу Земли для разной ориентации источника. Смоделировано просачивание в верхнюю ионосферу УНЧ излучений грозовых разрядов и промышленных 50/60 Гц излучений. Основные процессы импульсного электромагнитного взаимодействия между геофизическими оболочками, воздействие атмосферных процессов на околоземное пространство, и антропогенное электромагнитное «загрязнение» околоземного пространства становятся более понятными.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 22-17-00125).

ELECTROMAGNETIC ULF RESPONSE OF THE NEAR-EARTH SPACE ON THUNDERSTORMS AND INDUSTRIAL ACTIVITY

V. A. Pilipenko^{1, *}, D. D. Pozdnyakova¹

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: pilipenko_va@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ПОРОД ДОМОДЕДОВСКОГО КАРЬЕРА

М. В. Пирогов^{1, *}

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

*E-mail: mikap@list.ru

При расчёте петроупругих моделей неизбежно приходится так же моделировать и геометрию рассматриваемой породы, основываясь на теории эффективных сред (ТЭС), задавая аспектные отношения пор и зёрен горной породы, слагающих её матрицу. Нередко, при выборе геометрии модели, следуют правилу “as easy as possible” (как можно проще), тем самым упрощая и ускоряя расчёты.

Но, несмотря на преимущества данного подхода (единообразие моделей и их оперативное составление) — при необходимости построения модели повышенной точности возникает и необходимость точного описания геометрии композита породы. В данном случае и возникает необходимость в детальном изучении микроструктуры и уточнении модели на основе полученных данных.

Данная работа посвящена изучению микроструктуры известняков Мячковского горизонта из Домодедовского карьера и разности в расчётах, полученной в ходе построения моделей, максимально упрощая геометрию последней и полученной в ходе построения с учётом особенностей порового пространства.

Для проведения подобных исследований были использованы «шайбы», напильные из образцов горных пород, представляющих из себя цилиндры, размерами 6 см в длину на 3 см в диаметре. Все исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) TESCAN MIRA LMS в Институте физики Земли им. О. Ю. Шмидта. Результатом изучений стали фотографии участков, полученные на СЭМ на микроуровне и их карты фаз, где было выделено пустотное пространство в результате дифференциации на основе состава.

По полученным снимкам стало возможно уточнение геометрии порового пространства модели, что в последующем нашло отражение и в упругих свойствах горных пород. Полученные же карты фаз, помимо того, что дали количественную оценку параметра пористости, так же позволили уточнить геометрию модели.

INVESTIGATION OF THE MICROSTRUCTURE OF ROCKS OF THE DOMODEDOVO QUARRY

M. V. Pirogov^{1, *}

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: mikap@list.ru

РАСШИРЕННЫЙ КАТАЛОГ НЕДАВНИХ МЕСТ ПАДЕНИЯ МЕТЕОРОИДОВ НА МАРСЕ

Е. Д. Подобная¹*, О. П. Попова¹, Б. А. Иванов¹, Д. О. Глазачев¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: epodobnaya@idg.ras.ru

За последние десятилетия выполнялись повторяющиеся съемки поверхности Марса, позволяющие найти новые датированные места падения метеороидов метрового размера. Места падения считаются «новыми», если существует хотя бы один снимок, сделанный до удара [1]. На момент лета 2023 г. [2] обнаружено более 1400 свежееобразованных мест падений, состоящих из ранее опубликованного каталога [1] и примерно 245 добавленных нами мест падения. Больше половины (57%) падающих космических тел разрушается в атмосфере и образует кластеры кратеров. Анализ кластеров на Марсе позволяет изучать плохо различимые на Земле детали взаимодействия метеороидов с атмосферой. Изучение марсианских кластеров дает уникальную возможность независимо оценивать параметры метеороидов, исследовать различные типы фрагментации для объектов различного состава и происхождения.

Распределение малых тел в Солнечной системе по размерам (SFD), так же, как и распределение образованных ими кратеров, дает представление о происхождении и эволюции этих тел. Данные нашего каталога дали возможность оценить показатель степени в дифференциальном и кумулятивном распределении кратеров по размерам, который оказался ниже, чем предполагается в большинстве работ, но близок к оценкам, полученным по нерасширенному каталогу. Разрушенные и неразрушенные метеороиды описываются одним распределением.

Была предложена классификация мест падения метеороидов на Марсе. Предложенные группы были обобщены до 3 типов мест падения: доминирующий главный кратер, 2 наибольших кратера сравнимы, и 3 или более сравнимых наибольших кратера, все дополнены (или нет) значительно более мелкими кратерами. Мы предполагаем, что выделенные группы могут соответствовать различным типам ударников и (или) различным типам разрушения метеороида в атмосфере. Группа с двумя наибольшими кратерами на данный момент выглядит неоднородной, и, возможно, потребует разделения на две подгруппы.

Оценки показателя степени в распределении по диаметрам для метеороидов, образовавших выделенные группы мест падения, находятся в хорошем соответствии с оценками, полученными по кластерам, и несколько ниже известных оценок для распределения по размерам земных болидов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 23-27-00432).

Литература

1. Daubar I.J., Dundas C.M. and 16 coauthors. New Craters on Mars: An Updated Catalog // JGR: Planets. 2022. Vol. 127. P. e2021JE007145.
2. McEwen A.S. and 15 coauthors. Mars reconnaissance orbiter's high resolution imaging science experiment (HiRISE) // JGR: Planets. 2007. Vol. 112 (E5).

AN EXPANDED CATALOG OF RECENT METEOROID IMPACT SITES ON MARS

Е. Д. Podobnaya¹*, О. П. Popova¹, Б. А. Ivanov¹, Д. О. Glazachev¹

¹Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: epodobnaya@idg.ras.ru

РАЗЛЕТ ФРАГМЕНТОВ МЕТЕОРОИДА ПРИ РАЗРУШЕНИИ

О. П. Попова¹, Е. Д. Подобная^{1, *}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: epodobnaya@idg.ras.ru

Одним из важных параметров при оценке фрагментации космических тел является скорость, перпендикулярная траектории полета метеороида, возникающая в момент разрушения за счет взаимодействия ударных волн фрагментов. Величина этой скорости приводит к различной дальности разлета фрагментов. Еще одним фактором, влияющим на дальность разлета, является угол входа. Фрагменты метеороида разлетаются на наименьшее расстояние при вертикальном входе, с уменьшением угла расстояния увеличиваются.

В настоящее время опубликованы данные о 1200 недавних мест падения метеороидов на Марсе, среди которых около 60 пар кратеров с различным соотношением размеров. Наблюдаемые кратерные пары были разделены на две группы. Первая группа (17 случаев) объединяет пары с различием в диаметрах не более 20% (большинство случаев соответствует разнице в массах не более 50%). Вторая группа состоит из 46 пар, кратеры в которых сильно различаются размерами (до 13 раз). Близкие по размеру пары кратеров представляют собой наиболее простой случай распада метеороида на два фрагмента, в этом случае торможение и абляция в атмосфере одинаковы, атмосферная сортировка пренебрежимо мала, а расстояние между фрагментами возникает только за счет их взаимодействия после разрушения. Пары близких по размеру кратеров являются идеальными данными наблюдений для сравнения с теоретическими оценками разброса фрагментов при разрушении. Пары сильно различающихся кратеров обеспечивают дополнительную проверку этих оценок. Изучение расстояния между кратерами в паре дает возможность оценить плотность ударников и их возможную долю во всей популяции метеороидов. Мы провели численное моделирование движения комет и астероидов в атмосфере Марса и их фрагментации на два фрагмента с различным соотношением масс. В моделировании варьировались такие параметры как размер, плотность и прочность ударника, скорость и угол входа в атмосферу, а также высота и тип материала поверхности Марса. Для удобства сравнения наблюдательные данные и результаты численного моделирования были разделены на 4 группы в зависимости от соотношения кратеров (пары близких кратеров составили одну из групп). Результаты моделирования для случая разрушения на два одинаковых фрагмента показывают, что больше половины наблюдательных данных (11 из 17) можно описать ударниками, входящими в атмосферу под углом 45°. Еще 5 случаев можно описать косым входом (угол входа менее 30°) кометного тела. Оставшийся случай требует отдельного рассмотрения. Численное моделирование разрушения метеороида на два сильно различающихся по размерам фрагмента показало, что большую часть наблюдений (28 из 46) можно описать фрагментацией космических тел, вошедших в атмосферу под углом 45°. Учет косого угла входа в атмосферу дал возможность описать еще 13 случаев. Оставшиеся 5 кратерных пар на поверхности Марса с различным соотношением размеров требуют дополнительного рассмотрения. Таким образом, лишь 5 из 63 наблюдательных данных требуют отдельного моделирования с учетом известных для каждой пары параметров (высота над уровнем средней поверхности Марса, а также соотношение кратеров, по которому можно судить о соотношении масс фрагментов).

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900176-3).

LATERAL SPREADING OF METEOROIDS FRAGMENTS

O. P. Popova¹, E. D. Podobnaya^{1, *}

¹Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: epodobnaya@idg.ras.ru

О РЕЖИМЕ ВЫЗВАННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ

М. В. Родкин^{1, 2, 3, *}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук, Москва, Россия

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

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, Южно-Сахалинск, Россия

*E-mail: rodkin@mitp.ru

Давно известно, что землетрясения с глубиной более нескольких десятков километров не могут реализовываться по предполагаемому механизму хрупкого разрушения. Для объяснения более глубоких землетрясений был предложен ряд моделей, связывающих возникновение этих землетрясений с наличием глубинного флюида и с фазовыми превращениями. Эти предположения не были подкреплены, однако данные о различии наблюдаемых характеристик разноглубинных землетрясений были выявлены совсем недавно, причем характер различий отвечает теоретически ожидаемым различиям механизмов очагов неглубоких, среднеглубоких и глубоких землетрясений. Особую группу среди неглубоких землетрясений составляют приповерхностные землетрясения. Среди последних велика доля так называемых вызванных землетрясений и примыкающих к ним по своим характеристикам горных ударов. Возникает вопрос, отличаются ли характеристики таких событий от характеристик обычных неглубоких землетрясений? При этом режим вызванной сейсмичности представляет и особый практический интерес. Для ответа на поставленный вопрос рассмотрена сейсмичность в известных областях сильного развития вызванной сейсмичности (район водохранилищ Варна и Койна в Индии, газового месторождения Гронинген в Нидерландах, области интенсивной добычи сланцевых УВ в Оклахоме в США, и трех районов горных разработок: Жезказган, Североуральский бокситовый рудник и Северо-Кизеловский угольный бассейн).

Показано, что среди вызванных землетрясений различаются собственно вызванные техногенные землетрясения и горные удары и триггерные события, предположительно комплексного техногенно-естественного происхождения. Эти последние, ввиду большей удаленности от мест техногенного воздействия и энергетических соотношений заведомо не могут быть исключительно техногенными. Выявляется ряд специфических и практически важных особенностей режима вызванной сейсмичности. Во-первых, во всех перечисленных областях вызванной сейсмичности более или менее определенно наблюдается как резкий рост сейсмической активности, так и его последующий спад, в том числе и при продолжающемся сильном техногенном воздействии. Спад вызванной активности проявляется как в уменьшении потока значимых событий, так и в росте величин наклона графика повторяемости. Второй особенностью является отличие соотношения средней интенсивности фор- и афтершокового процесса от обычных землетрясений. Соотношение характерной интенсивности степенных потоков числа фор- и афтершоков исследовалось методом построения обобщенной окрестности сильного события. Как известно, при обычных землетрясениях средняя интенсивность афтершокового процесса на порядок и более сильнее форшокового каскада. При вызванной сейсмичности различие намного меньше, а в ряде случаев, в первую очередь для горных ударов, интенсивности фор- и афтершокового процесса оказываются одинаковыми. Заметим, что последнее согласуется с данными лабораторных исследований процессов разрушения. Различие в относительной активности фор- и афтершокового каскадов может указывать на различие физических механизмов разрушения и оказаться важным при построении механизмов прогноза приповерхностных естественных и вызванных землетрясений.

Спад активности вызванной сейсмичности (если это наблюдение подтвердится дальнейшими исследованиями) может отвечать разгрузке тектонических напряжений; наличие эффекта спада вызванной сейсмогенной активности при длительном сильном техногенном воздействии может иметь большое практическое значение.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 23-27-00395).

Автор признателен А. Кийко (ЮАР) и В. И. Герману и Р. А. Дягилеву (Россия) за предоставление каталогов локальной сейсмичности областей месторождений Гронинген, Жезказгана, Североуральского бокситового и Северо-Кизеловского угольного.

ON THE REGIME OF INDUCED SEISMICITY

M. V. Rodkin^{1, 2, 3}

¹*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Schmidt Institute of Physics of the Earth, of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³*Institute of Marine Geology and Geophysics, Far East Branch, of Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia*

**E-mail: rodkin@mitp.ru*

АНАЛИЗ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ, НОВЫЕ СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ

М. В. Родкин^{1,2,*}, А. А. Кислицын^{1,3}, М. Ю. Кислицына^{1,3}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук, Москва, Россия

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

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: rodkin@mitp.ru

Одной из важнейших характеристик при анализе динамических систем является степень стационарности их режима. Рост нестационарности, в частности, может являться указанием на опасность резкого изменения состояния системы, на развитие бифуркации, что весьма часто имеет большое практическое значение. Применительно к сейсмическому режиму под бифуркацией обычно имеют в виду сильное землетрясение. Из общих соображений принято считать, что показателем возможной близости такого события является рост нестационарности в поведении динамической системы. Оценка опасности возникновения сильного землетрясения обычно базируется на выявлении особенностей сейсмического режима или связанных с ним физических характеристик, типичных при сильных землетрясениях. В частности, за такие признаки можно принять комплекс аномалий, выявляемых при анализе окрестности обобщенного сильного землетрясения. Иной подход может базироваться на оценке степени нестационарности различных характеристик сейсмического режима. Обсуждаются два новых, ранее в геофизике не применявшихся, подхода к исследованию нестационарности динамических систем. Первый метод основан на анализе эволюции выборочных функций распределения переменной длины какого-либо параметра сейсмического режима. Недостатком этого метода является требование использования большого объема данных, по меньшей мере несколько десятков тысяч отсчетов. Применительно к анализу сейсмического режима это обычно трудновыполнимое требование. Второй метод основан на статистическом анализе графа ближайших соседей, первого, второго и далее порядка. Этот метод существенно менее требователен к объему используемой информации. Эти методы и возможности их применения иллюстрируются на примере анализа нестационарности рядов данных каталогов землетрясений регионов Курило-Камчатки и Срединно-Атлантического хребта. Пока рассматривалось применение этих методов не для прогноза сильных событий, а для выявления общих особенностей нестационарности сейсмического режима. Применение новых методов выявило ряд известных (ожидаемых) закономерностей и указало на ряд не тривиальных моментов. Среди таковых были выявлены: (1) тенденция роста нестационарности с увеличением характерного времени, что может отвечать соответствию спектра сейсмической активности фликкер-шуму; (2) отличие характера распределения по магнитудам, возможно отвечающая уменьшению величин *b-value* для кластеризующихся основных событий; (3) обнаружение в режиме сейсмичности по времени двух тенденций – кластеризации на меньших относительных временных интервалах времени и отталкивания на больших; эти тенденции могут соответствовать эпохам роста сейсмической активности и последующего затухания в ходе накопления тектонических напряжений. Результаты указывают на перспективность применения в сейсмологии этих новых методов анализа, обеспечивающих уточнение характера нестационарности сейсмического процесса.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №23-27-00395).

ANALYSIS OF NON-STATIONARITY OF DYNAMIC SYSTEMS, NEW STATISTICAL APPROACHES

M. V. Rodkin^{1,2,*}, A. A. Kislitsyn^{1,3}, M. Y. Kislitsyna^{1,3}

¹Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Institute of Physics of the Earth named after O.Yu.Schmidt RAS, Moscow, Russia

³Institute of Applied Mathematics named after M.V. Keldysh, Moscow, Russia

*E-mail: rodkin@mitp.ru

ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ РЕГИСТРАЦИИ КС GRACE НАД ОБЛАСТЯМИ СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ЗОНАХ СУБДУКЦИИ

Т. В. Рублева¹, К. В. Симонов², А. А. Кабанов³, А. С. Кругляков^{2, 3, *}

¹Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

²Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия

³Некоммерческое партнерство «Экологический центр рационального освоения природных ресурсов», Красноярск, Россия

*E-mail: piggsyy@gmail.com

В работе обсуждаются результаты исследования проявлений сильнейших землетрясений в зонах субдукции в сочетании с интерпретацией данных измерений космической системы (КС) GRACE. Выполнен анализ цифровых карт гравитационных аномалий, представленных в виде пространственного распределения параметра EWH (эквивалентная высота воды над контуром геоида), относительно очаговых областей сильнейших субдукционных землетрясений, произошедших за последние 20 лет. Показано, на примерах изучения этих сильнейших землетрясений, что данные измерений КС GRACE могут служить основой для оценки напряженно-деформированного состояния геосреды. При этом указанные данные позволяют повысить точность и надежность решения прогностических задач. Интерпретации данных измерений КС GRACE основаны на идее, что изменения гравитации в области, подготовленной к землетрясению, выступают триггером активизации сейсмического процесса, что аналогично роли гравитационных Лунно-Солнечных приливов. Изменения гравитации являются индикатором происходящих в очаговой зоне изменений, связанных с напряженно-деформированным состоянием горных пород, сопутствующих процессов движения жидкостей в их порах и внутренних полостях, а также вязких течений в более глубоких слоях Земли. Подтверждена, в частности, продуктивность концепции барицентра, применительно к выявленным особенностям сильнейших землетрясений в зонах субдукции. Показано на примере Чилийского катастрофического землетрясения 27 февраля 2010 г. ($M_w = 8.8$), что существует отрицательная корреляция между величиной геодинамического параметра H (расстояние от гипоцентра этого землетрясения до положения барицентра в системе Земля-Луна) и гравитационным параметром EWH . Наибольший коэффициент отрицательной корреляции между H и EWH , равный $R = -0.61$, отмечен в период регистрации максимального количества афтершоков в регионе Центрального Чили. Обнаруженная сильная отрицательная корреляция вариаций геодинамического параметра H и параметра EWH с декабря 2009 по декабрь 2011 гг. относительно эпицентральной области катастрофического Чилийского землетрясения 2010 г. хорошо укладывается в существующую логику. С параметром H связана величина центростремительного ускорения из-за взаимного вращения Земли и Луны, которое характеризует приливные силы, т.е. чем больше расстояние H , тем сильнее ослабевает гравитация, величине которой сопоставляются значения параметра EWH , поэтому наблюдается их отрицательная корреляция. Отметим также, что минимум расстояния между барицентром и гипоцентром может рассматриваться как триггер в рамках процесса подготовки ожидаемого сильнейшего землетрясения.

PROCESSING AND INTERPRETATION OF GRACE RECORDING DATA OVER AREAS OF THE STRONGEST EARTHQUAKES IN SUBDUCTION ZONES

T. V. Rubleva¹, K. V. Simonov², A. A. Kabanov³, A. S. Kruglyakov^{2, 3, *}

¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

²Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

³Non-Profit Partnership «Ecological Center for The Rational Development Of Natural Resources», Krasnoyarsk, Russia

*E-mail: piggsyy@gmail.com

БАЙКАЛЬСКИЙ РИФТ – ФОРМИРУЮЩИЙСЯ МЕГАРАЗЛОМ В ЕВРАЗИЙСКОЙ ПЛИТЕ

В. В. Ружич^{1, *}, Е. А. Левина¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

*E-mail: ruzhich@crust.irk.ru

В ходе длительного изучения сейсмотектонических условий формирования Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) авторами предлагается рассматривать ее развитие как следствие проявления многоуровневых деструктивных процессов в земной коре Центрально-Азиатской части Евразийского континента. Как известно, БРЗ состоит из серии рифтовых впадин разных размеров и возрастов, разделенных активно разрушаемыми межвпадинными перемычками. В них формируются многограновые системы сейсмоопасных разломов, генерирующих многочисленные землетрясения, в том числе с $M = 5.5-7.9$ и интенсивностью 7–11 баллов. В настоящее время протяженность БРЗ достигла размеров порядка 2000 км. По абсолютным датировкам возраста осадков в Байкальской впадине установлено, что изначально она увеличивалась по протяженности в течение примерно 60 млн лет. Известно, что рифтогенные процессы в земной коре океанов и континентов генетически обусловлены восходящими конвективными потоками разогретого мантийного вещества с пониженной плотностью, всплывающего в виде плюма от границы внешнего ядра и нижней мантии. Следствием теплообмена ядра и земной поверхности является тектоника плит с мантийными течениями, базальтовым вулканизмом, горообразованием, межплитной субдукцией и рифтогенезом. В пределах рифтовых зон всплывание и растекание мантийных потоков рассматривается как основная причина упруго-пластического растяжения земной коры. Во многих случаях эти процессы способствуют расколу тектонических плит, включая континентальные. Рассматривая с позиций космогеодинамики деструктивные процессы на Земле с представлениями в сфере физической мезомеханики, следует учитывать влияние планетарных сил горизонтального сжатия земной коры, при котором возникали повсеместно распространенные разломы типа сдвигов и надвигов. Их возникновение объясняется вариациями ротационного режима Земли, а также движениями ядра Земли. Следовательно, процессы рифтогенной сейсмотектонической деструкции в пределах литосферной оболочки нашей планеты порождаются синхронным воздействием двух энергетических источников: космогенного и эндогенного. Проведенный авторами анализ особенностей сейсмического режима в БРЗ за последние 300 лет с учетом каталога исторических сведений, позволяет фиксировать во времени и пространстве косейсмические вспарывания сегментов разломов с протяженностью в десятки и сотни километров. Данный результат свидетельствует о многоуровневом диапазоне иерархического соотношения очагов землетрясений по энергии и размерам. Показано, что сейсмическая активизация разломов в разных участках БРЗ возникает в моменты накопления разрывов до определенной плотности и наступления фазы слияния и скачкообразного перехода на более высокие ранговые уровни. В сейсмическом режиме БРЗ фиксируются следующие квазипериодичности длительностью: 1 год, 11 лет, с большей погрешностью также полувековая и вековая периодичности. Было показано, что их проявление обусловлено влиянием вариаций ротационного режима Земли. По мнению авторов, после выяснения причин возникновения БРЗ ее можно рассматривать как мегаразлом, или как развивающуюся дивергентную границу при деструкции континентальной земной коры на восточной окраине Евразийской плиты. При таком подходе есть возможность использовать законы физической геомеханики для реализации практических приложений, например, в сфере средне- и долгосрочного прогнозов землетрясений и уточнении оценок сейсмической опасности.

THE BAIKAL RIFT IS AN EMERGING MEGAFULT IN EURASIAN PLATE

V. V. Ruzhich^{1, *}, E. A. Levina¹

¹Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

*E-mail: ruzhich@crust.irk.ru

КОМПЛЕКСНЫЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ ПОЛЯМИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ МАССОВЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВОВ НА КАРЬЕРАХ КУРСКОЙ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ

Ю. С. Рыбнов^{1, *}, С. П. Соловьев¹, А. В. Крашенинников¹, С. Ю. Рыбнов¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: rybnov.y@mail.ru

Одним из определяющих факторов, характеризующих экологический аспект территории, является состояние воздушной среды в приповерхностном слое атмосферы. Таким основным фактором является загрязнение вредными газами и мелкодисперсными частицами в результате деятельности промышленных предприятий. Другой отдельной проблемой деятельности промышленных предприятий является инфразвуковой фон, вариации которого в некоторых частотных диапазонах весьма отрицательно влияют на биологические объекты, в первую очередь на человека.

Приведены результаты комплексных инструментальных наблюдений за вариациями геофизических полей при проведении массовых промышленных взрывов на Лебединском и Стойленском карьерах Курской магнитной аномалии. Для проведения измерений использовался геофизический комплекс, позволяющий регистрировать вариации микрочастиц в атмосфере, уровень инфразвукового фона и напряженность электрического поля. Измерения проводились в двух стационарных пунктах и одном мобильном. Как показали проведенные исследования, массовые взрывы на Лебединском и Стойленском карьерах являются источником интенсивных колебаний давления, вариаций напряженности электрического поля и высокой концентрации микрочастиц в перемещающемся пылегазовом облаке.

Решающую роль в перемещении пылегазового облака взрыва играет направление ветра. Прохождение пылегазового облака над пунктом наблюдения вызывает интенсивные вариации напряженности электрического поля. Уровень инфразвукового фона вероятно связан с интенсивной работой горнодобывающей техники при погрузке руды и ее транспортировке большегрузным транспортом. Однако средний уровень инфразвукового фона при этом равен $\sim 55\div 62$ дБ и не превышает предельно допустимые уровни инфразвука на территории жилой застройки $75\div 90$ дБ.

Проведенные наблюдения позволили получить адекватные оценки как значений концентрации твердых частиц в воздухе при массовых взрывах, так и вариации уровня инфразвука и напряженности электрического поля в поселках, расположенных в непосредственной близости от карьеров.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900185-5).

COMPREHENSIVE INSTRUMENTAL OBSERVATIONS BEYOND GEOPHYSICAL FIELDS WHEN CONDUCTING MASS INDUSTRIAL EXPLOSIONS AT THE QUARRIES OF THE KURSK MAGNETIC ANOMALY

Yu. S. Rybnov^{1, *}, S. P. Soloviev¹, A. V. Krasheninnikov¹, S.Yu. Rybnov¹

¹Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: rybnov.y@mail.ru

ВЛИЯНИЕ КУЧЕВО-ДОЖДЕВЫХ ОБЛАКОВ НА ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ

**Ю. С. Рыбнов^{1, *}, А. А. Спивак¹, А. В. Крашенинников¹, С. Ю. Рыбнов¹,
С. А. Рябова¹, С. П. Соловьев¹, А. В. Тихонова¹**

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: rybnov.y@mail.ru

В последнее время значительно повысился интерес к изучению эффектов, сопровождающих сильные атмосферные явления природного и техногенного происхождения, особенно катастрофического характера. Это связано с необходимостью детального описания их последствий, а также разработкой их прогностических признаков. Формирование конвективных форм облачности и эффекты, связанные с их прохождением, служат хорошим индикатором масштаба негативных атмосферных явлений, таких как ураганы, шквалы, сильные ливни и грозы. Кучево-дождевые облака вида *Cb* (*cumulonimbus*) являются наиболее привлекательными для исследования с точки зрения прогнозирования и предупреждения опасных атмосферных явлений. Имеющиеся средства изучения таких облаков в виде радиолокаторов, лидаров и менее информативных визуальных средств не обеспечивают полноты информации о процессах, связанных с формированием *Cb* облаков и их ожидаемых последствий. В настоящей работе для этих целей предлагается привлекать данные о вариациях геофизических полей – электрического и магнитного, а также особенностей микробарических вариаций в приземном слое атмосферы. Одновременно с этим изучение влияния сильно развитой облачности на геофизические поля позволяет определить источники локальных возмущений, разделить влияние локальных и глобальных эффектов. Выполненный анализ зарегистрированных эффектов, сопутствующих прохождению крупных кучево-дождевых облаков, позволяет сделать вывод о возможности разработки нового подхода к определению влияния *Cb* облаков на геофизическое состояние приземной атмосферы, который при накоплении данных инструментальных наблюдений может составить количественную основу метода прогнозирования масштабов опасных атмосферных явлений и их негативных последствий.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900185-5).

EFFECT OF CUMULONIMBUS CLOUDS ON THE GEOPHYSICAL STATE OF THE SURFACE ATMOSPHERE

**Y. S. Rybnov^{1, *}, A. A. Spivak¹, A. V. Krasheninnikov¹, S. Y. Rybnov¹,
S. A. Riabova¹, S. P. Soloviev¹, A. V. Tikhonova¹**

¹Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, Moscow, Russia

*E-mail: rybnov.y@mail.ru

ОТКЛИК F2-СЛОЯ ИОНОСФЕРЫ В ЕВРОПЕЙСКОМ РЕГИОНЕ НА ГЕОМАГНИТНУЮ БУРЮ 23–24 МАРТА 2023 Г.

С. А. Рябова^{1, *}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: riabovasa@mail.ru

Изучение проявлений солнечной активности является одной из основных задач солнечно-земной физики. Главная ее цель – выяснение механизмов воздействия солнечных электромагнитных излучений и корпускулярных потоков на верхнюю атмосферу, ионосферу и магнитосферу и разработка методов прогнозирования проявлений солнечной активности. Одним из наиболее значимых факторов космической погоды, способным вызывать сильные возмущения в области ионосферы, является геомагнитная буря. Во время бури усиление электрических полей и выпадения энергичных частиц (на высоких широтах) приводят к генерации неоднородностей электронной концентрации различного масштаба, в том числе мелкомасштабных интенсивных неоднородностей. В результате сложных процессов взаимодействия в цепочке «атмосфера-ионосфера-магнитосфера» происходит значительное изменение токовой системы и глобальная перестройка ионосферы. В настоящей работе по данным нескольких европейских ионосферных станций анализируется отклик F-области ионосферы на интенсивную магнитную бурю с минимальным значением $SymH = -170$ нТл 23 по 24 марта 2023 г. В качестве исходных данных использовались данные вертикального зондирования ионосферы, размещенные на сайте Глобальной ионосферной радиообсерватории (GIRO). По ионограммам определялись основные характеристики ионосферы, на основе которых анализировался ионосферный отклик на магнитную бурю: критическая частота слоя F2-ионосферы (f_oF2) и высота максимума слоя F2 (h_mF2).

Событие началось в 12:00 UT 23 марта как положительная ионосферная буря, за которой последовала отрицательная ионосферная буря до 04:00 UT 24 марта. В ходе обработки и анализа данных установлена широтная зависимость реакции ионосферы, причем эта зависимость сильнее в северной среднеширотной области, что объясняется смещением к экватору среднеширотного ионосферного провала.

Исследования выполнены в рамках государственных заданий Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 1220329000185-5) и ИФЗ РАН.

RESPONSE OF THE F2 LAYER OF THE IONOSPHERE IN THE EUROPEAN REGION TO THE GEOMAGNETIC STORM OF MARCH 23-24, 2023

S. A. Riabova^{1, *}

¹Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: riabovasa@mail.ru

СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ МАССОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ РАЗМЕРОМ МЕНЕЕ 2.5 МКМ И ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В АВГУСТЕ 2023 Г. И ИХ СВЯЗЬ ПО ДАННЫМ ЦГМ ИДГ РАН

С. А. Рябова^{1, *}, С. П. Соловьев¹, А. В. Крашенинников¹, С. Ю. Рыбнов¹, Ю. С. Рыбнов¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: riabovasa@mail.ru

На основе данных инструментальных наблюдений, выполненных в Центре геофизического мониторинга г. Москвы Института динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, исследуются суточный ход массовой концентрации аэрозольных частиц размером меньше 2.5 мкм (PM_{2.5}) и суточный ход температуры воздуха в приземном слое атмосферы. Для августа 2023 г. установлено превышение среднемесячной температуры воздуха климатической нормы для Москвы и отсутствие превышения нормы среднесуточной концентрации PM_{2.5}. С целью определения суточной вариации концентрации частиц PM_{2.5} были отобраны дни с погодными условиями, близкими к условиям «хорошей погоды». Отбраковывались дни с осадками в виде дождя, с сильной облачностью, с максимальной среднесуточной горизонтальной скоростью ветра больше 3.5 м/с и с максимальной мгновенной горизонтальной скоростью ветра больше 7.5 м/с. Вариации концентрации PM_{2.5} в условиях «хорошей погоды» характеризуются наличием двух выраженных максимумов в утреннее и ночное время. Вариации массовой концентрации PM_{2.5} и температуры воздуха в течение суток соответствуют суточному ходу этих величин, характерному для Московского региона. В ходе анализа на основе коэффициента линейной корреляции Пирсона получена средняя корреляционная зависимость между среднесуточными значениями температуры и массовой концентрацией частиц PM_{2.5}. Анализ на основе вычисления кросс-коррелограммы для дней «хорошей погоды» показал, что вариации температуры опережают вариации массовой концентрации частиц PM_{2.5} на 2–3 часа. Однако 5 августа наблюдается наоборот опережение вариации массовой концентрации частиц PM_{2.5} на 8 часов вариации температуры воздуха, а 19 августа отмечаются синхронные вариации этих величин.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 1220329000185-5).

DAILY VARIATIONS IN THE MASS CONCENTRATION OF AEROSOL PARTICLES LESS THAN 2.5 MM IN SIZE AND AIR TEMPERATURE IN AUGUST 2023 AND THEIR RELATIONSHIP ACCORDING TO DATA FROM THE CENTRAL GEOLOGICAL MUSEUM OF THE IDG RAS

S. A. Riabova^{1, *}, S. P. Soloviev¹, A. V. Krasheninnikov¹, S. Yu. Rybnov¹, Yu. S. Rybnov¹

¹Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: riabovasa@mail.ru

ОЦЕНКА ВКЛАДА D-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ В ВЕЛИЧИНУ ПЭС ВО ВРЕМЯ СЕРИИ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК В СЕНТЯБРЕ 2017 Г.

И. А. Ряховский^{1,*}, С. З. Беккер¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: ryakhovskiy88@yandex.ru

Исследование вариаций параметров ионосферы в спокойных и возмущенных условиях является одним из ключевых вопросов современной аэронавтики, так как это очень важно для лучшего понимания физики процессов и точности прогнозов космической погоды. Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) вывели исследование процессов, происходящих в ионосфере, на новый уровень. Высокое пространственное и временное разрешение данных ГНСС позволило накопить достаточно большой объем экспериментальных данных о состоянии и динамике полного электронного содержания ионосферы (ПЭС) во время сильных гелиогеофизических возмущений, таких как солнечные затмения, солнечные вспышки, магнитные бури, землетрясения, извержения вулканов.

Увеличение интенсивности рентгеновского и ультрафиолетового (УФ) излучения, наблюдаемое во время солнечных вспышек, вызывает немедленное увеличение концентрации электронов в освещенной части ионосферы и, как следствие, изменяет значения ПЭС. Изменения потоков рентгеновского и ультрафиолетового излучения приводят к неравномерному увеличению концентрации электронов в разных слоях ионосферы. Кроме того, вспышки одного класса демонстрируют явное различие в спектрах солнечного излучения. Вклад нижней ионосферы в ТЕС варьируется в зависимости от спектра каждой конкретной вспышки. Он увеличивается при сильной рентгеновской составляющей и становится практически незначительным при преимущественном увеличении ультрафиолетовой части спектра, поскольку основная ионизация происходит на высотах E и F областей ионосферы.

В данной работе численно оценивался вклад нижней ионосферы в изменение полного электронного содержания в средних широтах во время серии солнечных вспышек X-класса, произошедших 6–10 сентября 2017 г. Вариации ТЕС были получены из экспериментальных данных GPS-приемников (ГФО «Михнево» ИДГ РАН). Расчет концентрации электронов в нижней ионосфере был проведен с использованием плазмохимической модели D – области ионосферы, разработанной в ИДГ РАН.

Анализ спектров рассмотренных вспышек и динамики электронного содержания в различных областях ионосферы позволил построить эмпирическую зависимость вклада нижней ионосферы в изменение ПЭС от спектрального состава вспышки. В результате анализа было установлено, что для вспышек с различным спектральным составом вклад нижней ионосферы в изменение ПЭС варьировался от 7 до 23%.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (темы №№ 122032900175-6, 122032900184-8).

ESTIMATION OF THE CONTRIBUTION OF THE IONOSPHERIC D REGION TO THE TEC VALUE DURING A SERIES OF SOLAR FLARES IN SEPTEMBER 2017

I. Ryakhovsky^{1,*}, S. Bekker¹

¹Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: yakhovskiy88@yandex.ru

ОБНАРУЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ОТКЛИКА ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЫ НА СНЧ СИГНАЛ, СГЕНЕРИРОВАННЫЙ НАЗЕМНЫМ ПРОТЯЖЕННЫМ ИСТОЧНИКОМ ЗЕВС И ЛИНИЯМИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ, НА НИЗКООРБИТАЛЬНОМ СПУТНИКЕ CSES

Н. В. Савельева^{1, *}, В. А. Пилипенко¹, Н. Г. Мазур¹, Е. Н. Федоров¹, Шуфань Жао²

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

²Национальный Космический Центр, Пекин, Китай

*E-mail: nasa2000@yandex.ru

В докладе представлены результаты эксперимента, в котором в качестве источника излучения использована российская установка ЗЕВС, расположенная на Кольском полуострове, к юго-востоку от Мурманска, а в качестве приемника излучения – оборудование, установленное на китайском геофизическом научном спутнике CSES. Установка ЗЕВС состоит из двух горизонтальных проводников длиной ~ 60 км, проложенных на расстоянии ~ 1 км, и генераторов, которые создают в проводниках переменный ток частотой 82 Гц и силой в 200-300 А. Длина излучаемых ЗЕВС волн составляет 3658.5 км, что по масштабам сопоставимо с размерами тектонических плит коры Земли. Таким образом, ЗЕВС может имитировать естественное излучение, генерируемое до и во время катастрофических сейсмических процессов. В предыдущих работах была показана возможность прохождения СНЧ излучения через ионосферу, разработана теоретическая модель, которая позволяет рассчитать пространственную структуру электромагнитного поля протяженного источника СНЧ волн в верхней ионосфере, с учетом ее вертикально-неоднородной структуры. Данные о вертикальных профилях параметров ионосферы были рассчитаны с помощью модели *IRI*. На основании численного моделирования были получены зависимости амплитуды трех компонентов электромагнитного поля в верхней ионосфере в зависимости от расстояния от вертикали над источником излучения. Расчеты показывают, что амплитуды вертикальных компонентов электрического и магнитного полей, направленных вдоль линий магнитного поля, малы по сравнению с горизонтальными. Горизонтальные компоненты примерно равны по величине, т.е. должна наблюдаться круговая поляризация излучения. Амплитуды горизонтальных компонент относительно медленно спадают при удалении от источника. Для генерации сигнала, который можно зарегистрировать на спутнике с высотой орбиты 400–500 км, достаточно создать в проводнике силу тока в 135 А. Обнаружение сигнала проводилось с помощью научного оборудования китайского спутника CSES, который был запущен 2 февраля 2018 года. Детектор электрического поля EFD измеряет вектор электрического, индукционный магнитометр SCM измеряет вектор переменного магнитного поля, а высокоточный детектор НРМ измеряет вектор геомагнитного поля, данные которого были использованы для расчета матрицы перехода в систему координат, в которой вертикальная ось *Z* направлена вдоль линий магнитного поля Земли. Когда спутник находился на расстоянии 400–600 км от ЗЕВС, EFD и SCM регистрировали узкополосное излучение на частоте 82 Гц. В магнитной составляющей отмечено присутствие гармоник сигналов от других протяженных источников, такие как обычные ЛЭП, на частотах 50/60 и 100/120 Гц соответственно. Были проведены оценки амплитуд для сигнала 50 Гц. Таким образом, показана практическая возможность дистанционного обнаружения отклика верхней ионосферы на СНЧ излучение, испускаемое протяженным наземным источником. В естественной среде подобное СНЧ излучение предположительно возникает при смещении, напряжении литосферных плит и сопровождает катастрофические землетрясения. Результаты исследования могут быть применены при разработке методов обнаружения аномального СНЧ излучения, предвещающего катастрофические землетрясения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 22-17-00125).

DETECTION OF THE UPPER IONOSPHERE RESPONSE TO ELECTROMAGNETIC ULF RADIATION, GENERATED BY THE GROUND-BASED EXTENDED SOURCE ZEVS AND POWER TRANSMISSION LINES, BY LOW-ORBIT SATELLITE CSES

N. V. Savelyeva^{1, *}, V. A. Pilipenko¹, N. G. Mazur¹, E. N. Fedorov¹, Zhao Shufan²

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²National Space Center, Běijīng, China

*E-mail: nasa2000@yandex.ru

МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В ИОНОСФЕРЕ ПЕРЕД КАТАСТРОФИЧЕСКИМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ ТОХОКУ

Н. В. Савельева^{1, *}, В. А. Пилипенко¹

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

*E-mail: nasa2000@yandex.ru

Целью данного исследования является изучение связи между сейсмической активностью и ионосферными явлениями с целью выявления возможных предвестников землетрясений.

В качестве исследуемого параметра мы выбрали аномальные вариации полного электронного содержания (ПЭС) и максимальной концентрации электронов в ионосфере, которые наблюдались в различных слоях ионосферы до катастрофического землетрясения в Тохoku, произошедшего 11 марта 2011 г. у восточного побережья Японии. Для оценки ПЭС с заданными параметрами используются задержки распространения сигналов спутников глобальных навигационных систем (GNSS), принимаемые станциями сети GEONET. Мы использовали двумерные карты ПЭС, полученные на основе данных GNSS по Японии, предоставленных Университетом Нагойя, Япония, с временным разрешением 30 секунд на пространственной сетке 0.5×0.5 градуса по географической широте и долготы. Для сравнения мы также использовали двумерные карты ПЭС, рассчитанные с использованием модели UPC, основанной на сферических гармонических функциях, предоставленной Техническим университетом Каталонии (UPC).

Мы рассчитали интегральное полное электронное содержание (иПЭС) для исследуемого сейсмоактивного региона (26° и 46° С. Ш. и 128° и 148° В. Д.), который охватывает всю территорию Японии и эпицентры наиболее сильных толчков землетрясения Тохoku. В качестве второго независимого измерения мы также использовали измерения критической частоты F2 (foF2), полученные четырьмя станциями вертикального зондирования ионосферы в Японии. Как известно, указанный параметр является мерой максимальной концентрации электронов в ионосфере. Данные измерений foF2 представляют собой временные ряды в заданной точке пространства. Для учета солнечной и геомагнитной активности мы использовали данные об изменении индекса SME и индекса F10,7 см со временем. Таким образом, мы получили два временных ряда независимых измерений, содержащих информацию о возмущениях ионосферы, вызванных солнечной активностью, и аномальных явлениях, вызванных сейсмической активностью в пределах интересующего региона.

Затем мы применили метод, называемый декомпозицией сезонного тренда (STL), чтобы разложить полученные временные ряды на три компонента: долгосрочный тренд, который отражает годовые колебания солнечной радиации, вызванные движением Земли по орбите вокруг Солнца, суточные колебания, вызванные вращением Земли вокруг своей оси и аномальные вариации. Мы обнаружили, что существует корреляция между аномальными изменениями и ПЭС, и foF2, причем коэффициент корреляции Пирсона находится в диапазоне от 0.8 до 0.92. Предложенный метод позволяет исследовать возможные причинно-следственные связи между аномальными концентрациями электронов в ионосфере и сейсмическими событиями, с целью определения предвестников землетрясений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и РНФ (проект № 22-17-00125).

METHOD FOR IDENTIFICATIONS OF ANOMALOUS VARIATIONS OF ELECTRON CONCENTRATIONS IN IONOSPHERE BEFORE THE GREAT TOHOKU EARTHQUAKE

N. V. Savelyeva^{1, *}, V. A. Pilipenko¹

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: nasa2000@yandex.ru

МОДЕЛЬ ТЕКТОНИЧЕСКИ ОСЛАБЛЕННЫХ ЗОН РАЙОНА ОБРУЧЕВСКОЙ СИСТЕМЫ РАЗЛОМОВ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ НА ОСНОВЕ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ЛИНЕАМЕНТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МУЛЬТИМАСШТАБНОГО ПОДХОДА

А. Д. Свечеревский^{1, *}, С. А. Устинов¹, А. А. Остапчук²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: alexey@svecherevskiy.ru

Для выявления специфических особенностей развития каркаса разрывных нарушений различных рангов, в том числе оперяющих крупные разломы, определяющих локализацию рудной минерализации и формирующих структурно ослабленные и проницаемые зоны в районе простирающейся Обручевской системы разломов Байкальской рифтовой зоны на основе ГИС технологий и данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) проведён комплексный анализ, включающий структурно-геоморфологические, пространственно-геометрические, пространственно-плотностные и тектонофизические подходы.

На начальном этапе для района исследования с использованием данных ДЗЗ FABDEM создана и визуализирована цифровая модель рельефа (ЦМР). На основе ЦМР проводился линеаментный анализ. Линеаменты на ЦМР выявлялись с помощью разработанного программного обеспечения, использующего нейросетевые технологии. Данный подход позволил выделить на территории множество не протяженных линеаментов. Для выделения более протяженных линеаментов пространственное разрешение ЦМР последовательно с установленным шагом искусственно занижалось. Таким образом, удалось выделить линеаменты, соответствующие четырём масштабным уровням – региональному, субрегиональному, надлокальному и локальному. С целью реконструкции параметров регионального поля напряжений-деформаций – ориентировки осей сжатия и растяжения в горизонтальной плоскости, определения направлений сдвигового перемещения по разломам и воссоздания геодинамической обстановки формирования разлома для интерпретации пространственного положения выявленных линеаментов рассмотрена модель формирования парагенезиса оперяющих трещин магистрального разлома в зоне сдвига П. Л. Хэнкока. Специально для решения данной задачи авторами написано программное обеспечение Lineament Stress Calculator. На основе реконструкции ориентировки осей главных сжимающих или растягивающих усилий в регионе для каждой из выявленных и заверенных зон динамического влияния разрывных нарушений возможно визуализировать сегменты структур, в различной степени предрасположенные к сдвигу, участки концентрации и рассредоточения деформаций. Помимо линеаментов, проведено дешифрирование и интерпретация структур центрального типа (СЦТ). Детальное дешифрирование СЦТ позволяет выявить проекции ослабленных зон на дневную поверхность.

На основе полученных результатов сформулированы структурные критерии и факторы тектонически ослабленных зон, с использованием которых, с применением средств комплексного пространственного ГИС анализа создана весовая модель.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 20-77-1008).

MODEL OF TECTONICALLY WEAKENED ZONES IN THE OBRUCHEV FAULT SYSTEM AREA OF THE BAIKAL RIFT ZONE BASED ON TECTONOPHYSICAL INTERPRETATION OF LINEAMENTS USING A MULTISCALE APPROACH

A. D. Svecherevskiy^{1, *}, S. A. Ustinov¹, A. A. Ostapchuk²

¹Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Sadovsky Institute of Dynamics of Geospheres of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: alexey@svecherevskiy.ru

ЛУННО-СОЛНЕЧНЫЕ ПРИЛИВЫ КАК ОДИН ИЗ ВОЗМОЖНЫХ ТРИГГЕРОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Д. Г. Семаков¹, Э. Р. Семакова¹, *

¹Астрономический Институт им. Улугбека Академии наук Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан

*E-mail: ella9sem@gmail.com

Узбекистан находится в сейсмоопасном районе, где за последние годы ежегодно регистрируется большое количество землетрясений. Большинство из них не являются опасными и имеют небольшую магнитуду, однако изучение возможных причин землетрясений всегда являлось актуальной научно-прикладной задачей, особенно после памятных событий 1966 г.

Цель работы заключалась в оценке возможного влияния таких астрономических процессов, как Лунно-Солнечные приливы, на процессы, происходящие в недрах Земли, а именно на момент события землетрясения.

Исходными данными служили материалы Всемирной Базы Землетрясений (USGS), ограниченные нижней магнитудой в 4,5 балла. Из рассмотренных случаев землетрясений, мелкофокусных оказалось почти в три раза больше, чем среднефокусных, глубокофокусных не оказалось вовсе.

Расчет периодических деформаций Земли, вызванных гравитационным влиянием Луны и Солнца, содержит около 700 гармоник с различными периодами (основными являются полусуточные и суточные волны). С использованием специализированных программ, учитывающих эти параметры, были построены суточные графики приливного возмущения над каждым очагом землетрясения по трем координатам, а также графики силы тяжести. Поскольку величины приливной волны по широте и долготе оказались незначительны по сравнению с ее величиной по высоте, то наибольшее внимание уделялось анализу распределения количества землетрясений различных категорий в зависимости от амплитуды Лунно-Солнечной приливной волны по высоте.

Получено, что большинство землетрясений происходит не в момент наибольших значений амплитуды прилива или отлива, как это было выявлено нами в случае с процессами на поверхности Земли, такими как оползни, снежные лавины и сели, а в моменты максимальной скорости изменения приливной силы (в момент, близкий к переходу через ноль и с дальнейшим увеличением силы тяжести).

Сравнивая расчеты приливной волны с расчетами силы тяжести на заданный момент времени получено, что при отливе регистрируется максимальное значение ускорения силы тяжести. Поверхность Земли при этом смещается к центру, что приводит к дополнительному увеличению ускорения силы тяжести, от чего эффект изменения амплитуды усиливается. Кроме того, рассмотрено влияние изменения атмосферного давления, однако выборка случаев оказалась невелика для окончательных суждений.

LUNAR-SOLAR TIDES AS ONE OF THE POSSIBLE TRIGGERS OF EARTHQUAKES

D. G. Semakov¹, E. R. Semakova¹, *

¹Ulugh Beg Astronomical Institute of the Uzbekistan Academy of Sciences, Tashkent, Uzbekistan

*E-mail: ella9sem@gmail.com

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ВЫЯВЛЕНИЮ ЭМАНАЦИОННЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ ПРИБАЙКАЛЯ)

К. Ж. Семинский^{1, *}, А. А. Бобров¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

*E-mail: seminsky@crust.irk.ru

В основу стратегии поиска эманационных предвестников землетрясений закладывается модель эксхалляции радона под воздействием тектонической и атмосферной нагрузки на участок земной коры. Она была предложена в результате анализа данных эманационного мониторинга, который проводится в течение нескольких последних лет на четырех станциях в Прибайкалье. В соответствии с моделью в тектонически спокойные периоды вариации объемной активности радона (ОАР) в почвенном воздухе контролируются атмосферным давлением (P), при уменьшении которого эксхалляция газа возрастает, а при увеличении, наоборот, ослабевает. В периоды тектонической активности внутренние силы увеличивают влияние на поле радона и, вместе с тем, определяют подготовку и реализацию сильных сейсмических событий.

В соответствии с этой моделью комплексный подход к поиску эманационных предвестников землетрясений состоял в проведении двух видов анализа данных мониторинга. Они направлены на выявление интервалов времени, когда влияние атмосферной нагрузки на поле радона снижается по причине усиления тектонического воздействия. Первый из видов анализа ориентирован на установление периодов нарушения синхронности вариаций ОАР и P , а второй – на выявление интервалов усиления связи ОАР с характеристиками сейсмической активности. В обоих видах исследований, кроме визуального сопоставления длинных рядов систематических измерений, использовались статистические методы. Они позволили выявить аномалии, которые относятся к разным типам, но концентрируются в определенные периоды времени. Это периоды усиления тектонической активности, ассоциирующиеся с наиболее сильными землетрясениями, а также с сейсмическими событиями, эпицентры которых располагаются вблизи станций мониторинга.

Количество, типы и распределение аномалий внутри интервала их сгущения различны для отдельных землетрясений. Однако, если эпицентр располагается в зоне чувствительности станции мониторинга, одна или несколько аномалий предшествуют главному толчку, т.е. относятся к категории предвестниковых. Таким образом, комплексный подход, апробированный на примере Прибайкалья, правомерен и эффективен для выявления эманационных предвестников сильных землетрясений. Разработка тактики выбора тех предвестников, которые являются ключевыми для прогноза землетрясения по параметру «время», связана с углубленным исследованием пространственно-временной структуры поля аномалий, выделенных на основе двух видов анализа данных мониторинга.

AN INTEGRATED APPROACH TO IDENTIFYING EMANATION PRECURSORS OF EARTHQUAKES (BY THE EXAMPLE OF THE BAIKAL REGION)

K. Z. Seminsky^{1, *}, A. A. Bobrov¹

¹Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

*E-mail: seminsky@crust.irk.ru

ГЕОНЕЙТРИНО, ГИДРИДНАЯ ЗЕМЛЯ И АБИОГЕННАЯ НЕФТЬ

В. Н. Сергеев^{1, *}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: svn@idg.ras.ru

Регистрация геонейтрино (электронного антинейтрино, рожденного при цепочке распадов урана U и тория Th в земных недрах) дает важную информацию о радиогенной составляющей теплового потока из недр Земли [1]. Помимо этого, позволяет определить достоверность моделей состава Земли.

В работах [2, 3] предложен способ сравнительного анализа на достоверность общепринятой хондритовой модели, в основе которой лежит состав метеоритного вещества, и модели гидридной Земли [4] по отношению количества тория к количеству урана Th/U в составе Земли. Для хондритовой модели – это отношение обычно принимается равным 3.9. Последние опубликованные результаты регистрации геонейтрино детекторами BOREXINO [5] и KamLAND [6] подтверждают это значение Th/U. В работах [2, 3] отношение Th/U в составе Земли оценено для модели гидридной Земли как 1.72. Различие значения Th/U в составе Земли для хондритовой модели и модели гидридной Земли очень существенные, что говорит не в пользу последней. Тем не менее, гидридная модель иногда используется как основа абиогенного происхождения нефти. Это обстоятельство не закрывает гипотезу абиогенного происхождения нефти, но ссылка на гидридную модель некорректна.

Литература

1. Bellini G. *et al.* Geoneutrinos and geoscience: an intriguing joint-venture; arXiv:2109.01482v1 [physics.geo-ph].
2. Bezrukov L. Geoneutrino and Hydridic Earth mode. Preprint INR 1378/2014; arXiv:1308.4163v.2 [astro-ph.EP].
3. Bezrukov L., Sinev V. Geoneutrinos and Hydridic Earth (or primordially Hydrogen-Rich Planet); arXiv:1405.3161v.1 [astro-ph.EP].
4. Larin V. N. / ed. C. Warren Hunt. Hydridic Earth: the New Geology of Our Primordially Hydrogen-Rich Planet. Polar Publishing. Calgary, Alberta. Canada. 1993. – 247p.
5. Agostini M. *et al.* Comprehensive geoneutrino analysis with BOREXINO // Phys. Rev. 2020. D 101, 012009; arXiv:1909.02257v1 [hep-ex].
6. Abe S. *et al.* Abundances of uranium and thorium elements in Earth estimated by geoneutrino spectroscopy // Geophysical Research Letters. 2022. Vol. 49 (16). P. e2022GL099566; arXiv:2205.14934v2 [physics.geo-ph].

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900176-3).

GEONEUTRINOS, HYDRIDE EARTH AND ABIOGENIC OIL

V. N. Sergeev^{1, *}

¹Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: svn@idg.ras.ru

ИНДУЦИРОВАННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ В РАЙОНЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ КУМТОР (ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ТЯНЬ-ШАНЬ)

И. Н. Соколова^{1, *}, А. В. Березина², И. П. Габсатарова¹, Е. В. Першина²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Обнинск, Россия

²Институт сейсмологии Национальной Академии Наук Кыргызской Республики, Бишкек, Кыргызстан

*E-mail: sokolova.inessa@mail.ru

Золоторудное месторождение Кумтор расположено на северо-западном склоне хребта Ак-Шыйрак Центрального Тянь-Шаня, на высоте 5200 м. Район характеризуется наличием нескольких крупных надвиговых зон разломов, простирающихся в северо-восточном направлении и имеющих юго-восточное падение под меняющимися углами. На территории месторождения и прилегающих территориях с радиусом 50 км не известны инструментально зарегистрированные землетрясения с магнитудой $M > 5.5$. Начиная с 1997 г. рудник Кумтор начал коммерческую добычу золота открытым способом. Ежегодно на его территории производится несколько сот карьерных взрывов [1], в последние годы их количество резко возросло, в 2023 г. было зарегистрировано 965 карьерных взрывов в диапазоне энергетических классов $K_p = 2 \div 8$.

Наличие активных разломов на территории месторождения, взрывные работы, а также перемещение больших объемов грунта приводит к значительной дополнительной нагрузке на земную кору и к реализации некоторых геодинамических процессов, позволяющих коре перейти к новому равновесному состоянию. В связи с этим, на территории месторождения в последние годы наблюдается эффект наведенной сейсмичности, проявляющийся в увеличении количества землетрясений и их энергии. Мониторинг сейсмических событий на территории месторождения Кумтор осуществляется сейсмическими станциями региональных сетей Кыргызстана KINET, KNET и ЦАИИЗ, а также тремя широкополосными чувствительными станциями, установленными в районе месторождения в 2022 г.

Был изучен сейсмический режим района месторождения, исследовано возможное влияние как антропогенных факторов, так и воздействие сильных землетрясений Центральной Азии на характеристики сейсмичности. Были изучены особенности волновой картины карьерных взрывов и землетрясений. Проведена перелокализация сейсмических событий методом двойных разностей HYPODD. Изучены записи сильных движений акселерометра сильных движений, расположенного на территории месторождения. Кроме эндогенных событий в районе месторождения регистрируются и экзогенные явления, так, 1 декабря 2019 г. в районе Кумтора сошел катастрофический оползень объемом 12 млн 825 тыс кубометров. Оползень был зарегистрирован несколькими региональными сейсмическими станциями, изучены динамические и кинематические параметры его записи. Исследованы факторы, обусловившие сход оползня, с большой вероятностью обусловленные антропогенной деятельностью [2].

Литература

1. Омурбек К., Омуралиев М., Омуралиева А., Абдрахматов К.Е. Изучение ежедневных промышленных взрывов на месторождении «Кумтор» в 2020–2021 гг. // Российский сейсмологический журнал. 2024. Т. 6. № 1. С. 29–41. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2024.1.02> EDN: KHPFIL.

2. Берёзина А.В., Соколова И.Н., Першина Е.В., Соколова Н.П. Регистрация крупного оползня вблизи угольного месторождения Кара-Кече сейсмическими станциями Кыргызстана // Вестник Института сейсмологии НАН КР. 2020. № 2 (16). С. 23–30.

INDUCED SEISMICITY IN THE AREA OF THE KUMTOR MINE (CENTRAL TIEN SHAN)

I. N. Sokolova^{1, *}, A. V. Beryozina², I. P. Gabsatarova¹, E. V. Pershina²

¹Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Obninsk, Russia

²Institut of seismology of the National Academy of Sciences, Bishkek, Kyrgyzstan

*E-mail: sokolova.inessa@mail.ru

СИЛЬНЫЕ ПОЖАРЫ КАК ИСТОЧНИК ВОЗМУЩЕНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

**А. А. Спивак¹, А. В. Крашенинников¹, С. Ю. Рыбнов¹, Ю. С. Рыбнов¹, С. А. Рябова^{1, *},
С. П. Соловьев¹, А. В. Тихонова¹**

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: riabovasa@mail.ru*

Пожары оказывают значительное влияние на состояние региональных экосистем, угрожают населенным пунктам и объектам инфраструктуры, являются одним из значимых источников загрязнения биосферы. Сильные пожары приводят к утрате производственных помещений, средств производства, личного имущества, а часто – гибели людей. Особое внимание необходимо уделять пожарам антропогенного происхождения в крупных городских агломерациях. В отличие от природных пожаров, пожары в мегаполисах причиняют наибольший ущерб. Это требует разработки новых методов обнаружения и идентификации крупных пожаров, а также установления их последствий в широком смысле с целью своевременного принятия мер по борьбе с ними, повышения надежности контроля безопасности больших по площади территорий городских агломераций с целью ранней локализации и предотвращения катастрофических последствий этого явления, а также для снижения негативного влияния на их экологию. Геофизический мониторинг, основанный на регистрации и анализе возмущений физических полей в окружающей среде, может рассматриваться как действенный метод мониторинга пожаров. Для разработки конкретных подходов к мониторингу и контролю пожаров особое внимание необходимо уделять результатам инструментальных наблюдений. Настоящие исследования нацелены на анализ геофизических последствий крупных пожаров в Московском регионе.

Результаты инструментальных наблюдений свидетельствуют о том, что крупные пожары в условиях мегаполиса проявляются в вариациях термодинамического режима атмосферной турбулентности, в виде акустико-гравитационных волн, вариаций электрического и магнитного поля, а также повышения концентрации твердых частиц в приземной атмосфере.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900185-5).

STRONG FIRES AS A SOURCE OF THE GEOPHYSICAL ENVIRONMENT DISTURBANCE

**A. A. Spivak¹, A. V. Krasheninnikov¹, S. Y. Rybnov¹, Y. S. Rybnov¹, S. A. Riabova^{1, *},
S. P. Soloviev¹, A. V. Tikhonova¹**

¹Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: riabovasa@mail.ru*

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМАЦИИ ГОРНЫХ ПОРОД

Ю. П. Стефанов^{1, *}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

*E-mail: yu_st@mail.ru

Неоднородное строение горных пород, наличие пор и трещин разного масштаба приводят к их нелинейному поведению под нагрузкой. Их упругие и прочностные свойства зависят от напряженного состояния. Необратимая деформация горных пород может сопровождаться разрыхлением или уплотнением, а зоны локализации иметь разную ориентацию. При рассмотрении процессов необратимой деформации и разломообразования в земной коре часто необходимо учитывать наличие флюида, а также изменение температуры и даже физико-химические процессы.

В докладе кратко описаны важнейшие особенности поведения и соответствующие проявления на диаграммах нагружения. Показан анализ диаграмм нагружения для выбора базовой модели поведения и определения ее параметров, а также уточнения/построения дополнительных определяющих соотношений. Рассмотрена модель, основанная на комбинированной предельной поверхности и неассоциированным законом течения. Такая модель позволяет описывать процесс необратимой деформации с учетом дилатансии и компаксии. Кроме того, обсуждается применение концепции накопления повреждений для учета деградации прочностных свойств под действием нагрузки с течением времени. Введение элемента вязкости позволяет описывать эффекты ползучести, а также обеспечивает сходимость результатов численного расчета.

Приведены примеры численного моделирования поведения образцов горных пород, иллюстрирующие адекватность модели. На примере деформирования образца с внутренней трещиной показано, что необратимая деформация горных пород может развиваться не только при активном нагружении, но и при разгрузке. Соответственно, циклическое нагружение может привести к накоплению необратимой деформации и развитию внутренних трещин.

Рассмотрен ряд примеров моделирования процессов деформации в геологической среде. Показано, что конфигурация разломной зоны в верхних слоях земной коры в значительной мере зависит как от свойств пород, в первую очередь, внутреннего трения и порового давления, так и от соотношения вертикальной и горизонтальных составляющих нагрузки, определяющих главные оси нагружения. От этих факторов зависит также расположение очагов зарождения и направление развития зон локализации деформации. В определенных случаях первичные структуры нарушений формируются на поверхности и развиваются вглубь на ограниченную глубину. При наличии полостей на строение и размеры зон нарушений под действием гравитационной нагрузки существенное влияние оказывают кинетические факторы накопления повреждений.

FEATURES OF BEHAVIOR AND MATHEMATICAL MODEL OF ROCK DEFORMATION

Y. P. Stefonov^{1, *}

¹Trofimuk Institute of petroleum Geology and Geophysics of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

*E-mail: yu_st@mail.ru

ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВБЛИЗИ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 9 АВГУСТА 2023 ГОДА НА САХАЛИНЕ (M = 3.8)

Н. С. Стовбун¹*, Л. М. Богомолов¹, А. С. Закупин¹, И. П. Дудченко¹, С. А. Гуляков¹, А. И. Казаков¹

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

*E-mail: nikolay19972016@gmail.com

С июня 2023 г. на территории Института морской геологии и геофизики ДВО РАН создан стационарный пункт измерений электротеллурического поля, который представляет собой систему из трех измерительных диполей, подключенных к регистратору на основе персонального компьютера и аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Первоочередной целью исследования являлось изучение вариаций электротеллурического поля под воздействием естественных и техногенных факторов. Подобные измерения, например, давно проводились на Камчатке [1], где изучалась связь электрических потенциалов с подготовкой землетрясений. Во Франции [2] похожие эксперименты проводились вблизи вулкана «Фурнез» с целью мониторинга вулканической активности. Учитывая, что на территории Сахалинской области подобные исследования в активной форме не проводились, размещение цифровых пунктов измерений электротеллурического поля могут принести новые результаты. В данной работе приводятся результаты измерений электротеллурического поля вблизи очага землетрясения, которое произошло 09.08.2023 г. (M = 3.8) в непосредственной близости к пункту измерений. В ходе анализа был обнаружен сигнал длительностью 4–5 секунд с периодом 130–150 секунд в ночное время суток. Амплитуда сигнала постепенно увеличивается с июня 2023 года (3–5 мВ) и проявляется только на двух каналах и достигает своего пика (15–30 мВ) на момент сейсмического события 09.08.23 г., при этом уже проявляясь отчетливо на всех каналах. Далее, после землетрясения амплитуда снижается вплоть до 11.09.23 г. Была произведена цифровая обработка измерений с 11.09.2023 до 31.01.2024 гг., где появление похожей аномалии уже не наблюдалось. Безусловно, существует множество потенциальных источников генерации помех – радио сигнал или ионосферные влияния. Поиск и попытки подтверждения техногенной природы данной аномалии не увенчались успехом. Причиной послужило проявление сигнала только в ночное время суток и отсутствие четкого периода следования. Вблизи пункта измерений отсутствует какой-либо искусственный процесс, способный генерировать такую серию импульсов. Таким образом, данная аномалия потенциально может быть связана с процессами в очаге землетрясения. На данный момент это наиболее вероятная версия, ведь обнаруженные сигналы во времени коррелируют с одним из двух сейсмических событий на весьма солидном временном промежутке (больше 8 месяцев). Для расширения базы данных и поиска похожих аномалий планируется увеличение количества пунктов измерений на территории Сахалинской области.

Литература

1. Юшко В.А. Многомерный анализ временных рядов электротеллурических данных на пункте Верхняя Паратунка (Камчатка) // Вестник Камчатской региональной ассоциации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. 2007. № 1 (9). С. 159–168.

2. Богоутдинов Ш.Р., Агаян С.М., Гвишиани А.Д. и др. Алгоритмы нечеткой логики в анализе электротеллурических данных в связи с мониторингом вулканической активности // Физика Земли. 2007. № 7. С. 72–85.

VARIATIONS OF THE ELECTROTELLURIC FIELD NEAR THE EARTHQUAKE ON AUGUST 9, 2023 ON SAKHALIN (M = 3.8)

N. S. Stovbun¹*, L. M. Bogomolov¹, A. S. Zakupin¹, I. A. Dudchenko¹, S. A. Gulyakov¹, A. I. Kazakov¹

¹Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

*E-mail: nikolay19972016@gmail.com

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ КАМЕННЫХ ЛАВИН И ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ ДРОБЛЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ИХ ФОРМИРОВАНИИ

А. Л. Стром^{1, *}

¹Научно-исследовательский институт энергетических сооружений - филиал АО «Институт Гидропроект», Москва, Россия

*E-mail: strom.alexandr@yandex.ru

Каменные лавины, описываемые как исключительно быстрые, массивные, катакластические ламинарные потоки раздробленных горных пород, трансформирующиеся из крупных скальных оползней, происходят в горных районах практически по всему миру. Они обычно образуются, когда объем изначального оползня превышает 1 миллион кубометров вне зависимости от типов горных пород. Каменные лавины известны в слабых неогеновых конгломератах и в прочных осадочных, метаморфических и изверженных горных породах. Образующиеся отложения характеризуются двучленным внутренним строением – с крупнообломочной, обычно относительно тонкой панцирной фацией, часто с глыбами метровых размеров, покрывающей все тело каменной лавины, и с объемной внутренней фацией, сложенной интенсивно раздробленным материалом с размером обломков от нескольких дециметров до микронных и даже до наноразмерных частиц. Иногда удается наблюдать и базальную фацию. Более того, имеются данные, что чем прочнее исходная порода, тем интенсивнее она дробится. Еще одной особенностью каменных лавин является их перемещение в виде ламинарного потока, без турбулентного перемешивания обломочного материала. Это отчетливо видно, когда область обрушения сложена породами разного типа (и цвета). Иногда даже рыхлый материал осыпей, вовлеченных в каменную лавину, образует отдельные «слои» или «линзы» в отложениях. Следует подчеркнуть, что грубообломочный покров образуется не в результате всплывания более крупных блоков в движущейся обломочной массе, а в результате намного менее интенсивного дробления в покрывающей толще, часто без сколько-нибудь выраженной переходной зоны между глыбовой панцирной и раздробленной внутренней фациями. Движение панцирной фации напоминает движение расколотого льда в половодье. Такие особенности характерны для каменных лавин вне зависимости от пройденного ими расстояния и от ограничений на пути их распространения и должны учитываться при разработке механических моделей из образования и движения. Эксперименты, выполненные в ИДГ РАН Л. М. Перником и В. К. Марковым, показали, что незатухающее дробление без перемешивания материала может быть достигнуто при сочетании циклического осевого нагружения в сочетании со сдвигом. Предполагается, что интенсивное дробление в теле внутренней фации происходит не в результате повторяющихся соударений отдельно двигающихся обломков, как, например, при обвалах, а вследствие прохождения интенсивных волн давления, сочетающихся со сдвиговыми деформациями. Скорее всего, это приводит к образованию кратковременных силовых цепочек, где напряжения превосходят прочность горных пород. Учитывая, что перемещение каменных лавин, двигающихся со скоростями в 100–400 км/ч, занимает от нескольких десятков секунд до нескольких минут, эффективность происходящего при этом дробления должна быть исключительно высокой, более высокой, чем при карьерных взрывах и в промышленных мельницах. Воспроизведение этих процессов в технических устройствах может открыть путь к созданию более эффективного оборудования для дробления горных пород.

STRUCTURAL FEATURES OF ROCK AVALANCHES' DEPOSITS AND POSSIBLE MECHANISM OF ROCK FRAGMENTATION DURING THEIR FORMATION

A. L. Strom^{1, *}

¹Scientific Research Institute of Energy Structures – branch of the JSC «Hydroproject Institute», Moscow, Russia

*E-mail: strom.alexandr@yandex.ru

ЭВОЛЮЦИЯ ЗОН СТАБИЛЬНОСТИ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ В МОРСКОМ ДНЕ ВСЛЕДСТВИЕ ЯВЛЕНИЯ ВЫПАХИВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ДНА ДВИЖЕНИЕМ АЙСБЕРГОВ В СЕВЕРНЫХ МОРЯХ

Е. И. Суетнова^{1, *}

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

**E-mail: elena_suetnova@mail.ru*

Стабильность газовых гидратов в морском дне северных морей зависит от наличия газов (и в растворённой форме) и газосодержащих флюидов и соблюдения условий термобарической стабильности газовых гидратов в среде морского дна. Изменение термобарических условий вследствие различных процессов в морском дне может приводить к разложению газовых гидратов. В некоторых регионах северных морей (например, в Баренцевом море) наблюдались на поверхности дна протяженные следы выпakhивания поверхности дна движением айсбергов. Результаты этого процесса выпakhивания должны вызывать процессы изменения и эволюции температур и давлений в среде структур дна. В свою очередь, эти изменения и процесс эволюции термобарических условий должны приводить к изменениям положения потенциальной зоны стабильности газовых гидратов в морском дне. Результаты проведённого математического моделирования реакции теплового режима дна на процесс выпakhивания поверхностного слоя дна килем айсберга с использованием современных экспериментальных данных показал существенно нелинейный характер эволюции поддонной температуры по времени процесса. Эта особенность эволюции температуры делает некорректной возможность линейной оценки потенциального времени выпakhивания по данным температуры среды, полученным другими методами. Полученные в процессе моделирования распределения поддонных температур влияют на эволюцию положения зоны потенциальной стабильности газовых гидратов в морском дне. Эта эволюция может приводить к возможному разложению или перераспределению газовых гидратов и изучение этого процесса математическим моделированием важно для понимания процессов эволюции, фильтрации коровых флюидов и скоплений газовых гидратов и причин выбросов газа в арктическом дне.

EVOLUTION OF ZONES OF STABILITY OF GAS HYDRATES IN THE SEABED DUE TO THE PHENOMENON OF PLOWING OF THE SEABED SURFACE BY THE MOVEMENT OF ICEBERGS IN THE NORTHERN SEAS

E. I. Suetnova^{1, *}

¹*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**E-mail: elena_suetnova@mail.ru*

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ПОКМАРКОВ

А. А. Таирова^{1, *}, Н. А. Юдочкин¹, Г. В. Беляков¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: moscouposte@gmail.com

Покмарки представляют собой конусообразные воронки в рыхлых, тонкозернистых осадках на поверхности морского дна в результате выброса газа, в основном метана. Возникновение покмарков, прежде всего, связано с глубинными структурными процессами, на что указывает наличие в смеси гелия и водорода. В тоже время покмарки могут возникать в зонах мерзлых пород как на суше, например, на Ямале, так и на шельфе, из-за изменения термобарических условий на глубине залегания газогидратов, в результате чего газогидраты диссоциируют на газ и воду. Существует несколько моделей образования покмарков, наиболее распространенная газифлюидная модель, которая заключается в том, что под низкопроницаемым слоем собирается некоторый объем газа, из-за влияния гидростатических сил газонасыщенная смесь начинает приподнимать и выдавливать вышележащий слой, накопление газа с увеличением порового давления в верхней части платформенного чехла может привести к взрывному выделению газа. Триггерами образования покмарков может стать потеря устойчивости покрышки, ее герметичности в результате литостической нагрузки, землетрясения и т.д. При помощи сейсморазведки, непосредственно под покмарками были обнаружены столбчатые структуры, которые получили названия «газовые трубки», ширина их может достигать нескольких сотен метров, а глубина – нескольких километров.

В представленной работе методом физического эксперимента на оптически прозрачной модели рассматривается процесс накопления и выброса газа в тонкозернистой среде. По мере фильтрации воздушного потока происходило изменение плотности пористого слоя. Процессы перестройки структуры фиксировались скоростной видеокамерой. Эксперименты показали, что размер выброса и образующейся воронки зависит от таких параметров, как толщина слоя, давление газа, его расхода и режима фильтрации.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 22-67-00025).

LABORATORY MODELING OF POCKMARK FORMATION

A. A. Tairova^{1, *}, N. A. Iudochkin¹, G. V. Belyakov¹

¹Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: moscouposte@gmail.com

«ВЕЕРНЫЙ» МЕХАНИЗМ, СОЗДАЮЩИЙ НОВУЮ ФИЗИКУ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ СВЕРХЗВУКОВЫХ ТРЕЩИН В НАТУРЕ И В ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Б. Г. Тарасов^{1, *}

¹Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела (ВНИМИ), Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: bgtaras@gmail.com

В течение последних двух десятилетий внимание международного научного геомеханического сообщества привлечено к проблеме развития сдвиговых трещин с экстремальными скоростями. Возросший интерес к этой теме был мотивирован фактом распространения трещин землетрясений со скоростями, превышающими скорости упругих поперечных волн V_s (сверхсдвиговые трещины). Недавние лабораторные эксперименты продемонстрировали скорости роста трещин выше скоростей продольных упругих волн V_p (сверхзвуковые трещины). Объяснение механизмов таких экстремальных трещин с позиций классических теорий сталкивается с двумя проблемами: (1) согласно классическим теориям – развитие сверхзвуковых трещин $V > V_p$ невозможно. Это следует из условия, что передача энергии, выделяющейся при разрушении к кончику бегущей трещины, осуществляется через среду в виде упруго-динамических волн, распространяющихся с максимальной скоростью, равной скорости продольных упругих волн V_p . Следовательно, $V > V_p$ недостижимо; (2) вторая проблема касается обеих сверхсдвиговых и сверхзвуковых трещин. Непреложной особенностью экстремальных трещин является высокая скорость сдвига между берегами в головной части трещины, которая может достигать 10 м/с. Это свидетельствует о низком сопротивлении сдвигу, приближающемуся к нулю. Несмотря на то, что этот факт является ключевым для понимания механизмов землетрясений, природы разрушения и трения, до сих пор идут дискуссии о физическом механизме, создающем низкое трение в голове экстремальных трещин. Наибольшее число теорий связывают это с высокой температурой, вызывающей плавление внутри трещины или повышение давления газа или флюидов. Однако такой подход противоречит экспериментально доказанному температурному парадоксу, согласно которому температура в голове экстремальных трещин не возрастает, а понижается по сравнению со статическими скоростями. Предложены также механизмы динамического снижения трения, которые не связаны с высокими температурами. Например, снижение трения под воздействием вибраций, смазки твердыми веществами и др. Согласно этим моделям высокий коэффициент трения покоя ($\mu \sim 0.85$) в динамике падает до низких величин ($\mu \sim 0.2$), что предполагает высокую амплитуду сброса напряжений при землетрясении, которая на порядок превышает обычно наблюдаемый сброс напряжений при землетрясениях. В настоящем докладе обсуждаются физические основы недавно обнаруженного механизма формирования динамических сдвиговых трещин, который активизируется в цельных горных породах при напряженных состояниях, соответствующих сейсмогенным глубинам земной коры, а также в искусственных разломах лабораторных образцов, моделирующих землетрясения. Этот механизм назван «веерным механизмом» по конфигурации структуры головной части динамических трещин, которая формируется за счет интенсивного трещинообразовательного процесса, происходящего на кончике бегущей трещины. Веерная структура обладает рядом феноменальных свойств: – аномально низкое трение (близкое к нулю) независимо от скорости сдвига и при низких температурах; – усиление в десятки раз низкие приложенные напряжения до значений, превышающих прочность материала; – создание условий силового дисбаланса, вызывающего спонтанное продвижение веера; – новая физика энергоснабжения сверхзвуковых трещин путем концентрации энергии непосредственно в области кончика трещины, что не требует передачи энергии из периферийных областей. Анализ проведенных исследований показал, что экстремальные трещины в земной коре и в лабораторных экспериментах управляются веерным механизмом.

«FAN» MECHANISM CREATING NEW PHYSICS OF ENERGY SUPPLY TO SUPERSONIC RUPTURES IN NATURE AND IN LABORATORY EXPERIMENTS

B. G. Tarasov^{1, *}

¹Geomechanical institut (VNIMI), Saint-Petersburg, Russia

*E-mail: bgtaras@gmail.com

ОТКЛИК СЕЙСМИЧНОСТИ НА ИЗМЕНЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ И СОСТОЯНИЯ ЕЕ ИОНОСФЕРЫ, СВЯЗАННЫЕ С СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТЬЮ

Н. Т. Тарасов^{1, *}

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

*E-mail: tarasov@ifz.ru

В работах [1, 2] было изучено влияние магнитных бурь (МБ) на глобальную сейсмичность. Показано, что после них происходит значительное повышение суммарной энергии (СЭ) землетрясений, а их количество уменьшается. Похожее подавление сейсмичности наблюдается и после всплесков потока электромагнитного излучения Солнца (ЭИ). Однако СЭ при этом также уменьшается. Интересно, что эффективность воздействия МБ и ЭИ зависит от их сочетания. Наибольший прирост СЭ происходит после МБ, которые предварялись ЭИ за трое и менее суток. Однако осталось неясным, с чем это может быть связано. Поэтому с помощью методики наложения эпох было проанализировано изменение во времени потока ЭИ и скорости его изменения до и после МБ. Оказалось, что на протяжении, как минимум, 10-ти суток до МБ поток возрастает, а за трое суток начинает уменьшаться. При этом за трое суток до МБ производная от потока (dW/dt) меняет свой знак на отрицательный. При появлении всплесков ЭИ в пределах этого интервала поток продолжает возрастать и после начала МБ. Следовательно, эффективность триггерного воздействия МБ на сейсмичность определяется скоростью изменения потока ЭИ и ее знаком. МБ возникают при взаимодействии быстрых потоков солнечной плазмы с магнитосферой Земли. Такие потоки формируются корональными выбросами массы (КВМ). Значительная часть КВМ порождается солнечными вспышками. Во время них резко возрастает поток ультрафиолетового и рентгеновского излучения. Это усиливает ионизацию ионосферы Земли, которая возникает во время МБ.

Скорость солнечной плазмы на границе магнитосферы Земли во время рассматриваемых МБ лежала в пределах 309–1040 км/сек, запаздывания МБ относительно всплеска ЭИ менялось в пределах 1.6–5.6 сут. Следовательно, ЭИ от вспышки могли появиться до МБ не менее чем за 1.6 сут. Однако в этом интервале они фиксировались. Их источником могли служить повторные вспышки. Более того, максимальная эффективность воздействия МБ на сейсмичность достигалась, если они предварялись ЭИ всего за 3 часа. Можно предположить, что это связано с влиянием потоков солнечных космических лучей (СКЛ), которые также, как и ЭИ, возникают при солнечных вспышках. Из расчетов следует, что за 3 часа релятивистские протоны могут покрыть расстояние от Солнца до Земли, если их энергия не менее 1 МэВ. При этом их скорость должна составлять 0.046 от скорости света. Чтобы проверить это, с помощью методики наложения эпох было получено изменение концентрации таких протонов до и после МБ. В результате был выделен преобладающий максимум, практически совпадающий по времени с началом МБ. Поэтому было изучено изменение СЭ до и после тех МБ, которые за 1.6 и менее суток и предварялись резким повышением концентрации протонов с $E_K > 1$ МэВ. При этом было обнаружено значительное, статистически высоко значимое, повышение СЭ после таких МБ. Сопоставление показало, что СКЛ очень существенно повышают эффективность триггерного воздействия МБ на сейсмичность, которое более чем в 4 раза превосходит аналогичный эффект от ЭИ.

Литература

1. Тарасов Н.Т. Влияние солнечной активности на сейсмичность Земли // Инженерная физика. 2019. № 6. С. 23–33. <https://doi.org/10.25791/infizik.06.2019.668>
2. Tarasov N.T. Effect of solar activity on electromagnetic fields and seismicity of the Earth // Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021. 929. 012019. P. 1–8. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/929/1/012019>

RESPONSE OF SEISMICITY TO CHANGES IN THE EARTH'S MAGNETIC FIELD AND THE STATE OF ITS IONOSPHERE ASSOCIATED WITH SOLAR ACTIVITY

N. T. Tarasov^{1, *}

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth, of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: tarasov@ifz.ru

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ПОЛОС ЛОКАЛИЗОВАННОГО СДВИГА В МОДЕЛЯХ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО СЖАТИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ

А. А. Татаурова^{1,*}, Ю. П. Стефанов¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

*E-mail: tataurovaaa@ipgg.sbras.ru

Геологические разрывы в земной коре типа надвигов образуются при наличии горизонтальной составляющей тектонических сил. При этом наблюдается большое разнообразие конфигураций разрывов и рельефов дневной поверхности. Например, в горных и предгорных районах часто встречаются надвиги с обратным падением плоскости скольжения, известные как поддвиги. На данный момент нет однозначного объяснения механизмов и условий формирования различных структур. Для проведения исследования и изучения этих процессов широко применяется численное моделирование. Проведено исследование влияния механических свойств горных пород и условий деформирования на формирования полос локализованного сдвига. В качестве модели рассматривался слой среды прямоугольной формы, лежащий на жестком основании. Нагружение осуществлялось в два этапа: сначала задавалась гравитационная нагрузка, затем осуществлялось горизонтальное сжатие путем смещения боковой границы. Были рассмотрены варианты однородной и трехслойной среды. В работе использовалась упругопластическая модель. Поведение пород за пределом упругости описывалось критерием Друккера-Прагера-Николаевского. Задача решалась численно в двумерной постановке, с использованием явной конечно-разностной схемы. Результаты расчетов показывают, что в зависимости от прочностных свойств и коэффициента трения в основаниях слоя возможны различные сценарии формирования и развития полос локализованного сдвига. На начальном этапе горизонтального сжатия начинается развитие необратимой деформации и формирование полос локализованного сдвига вблизи дневной поверхности. При высоком внутреннем трении часто наблюдается обратное или разнонаправленное падение полос локализации. Эти полосы, как правило, не достигают основания слоя и не приводят к существенным изменениям в рельефе, поэтому их можно рассматривать как трещины или зоны ослабления пород. Значительные смещения вдоль зон локализации могут произойти в случае объединения двух полос локализованного сдвига, развивающихся навстречу друг другу. При высоком трении на подошве деформируемого слоя и низкой прочности среды развитие полос локализованного сдвига начинается от основания осадочной толщи в направлении дневной поверхности. В этом случае деформация часто не распространяется вдоль слоя, а остается сосредоточенной вблизи боковой границы модели, что приводит к локальному росту рельефа. Продвижение фронта деформации с формированием периодической системы полос наблюдается лишь при низком трении в основании или его снижением с ростом деформации. В слоистой среде процесс формирования полос локализованного сдвига становится более сложным. Главная особенность в том, что полосы сдвига могут развиваться в каком-то одном или нескольких слоях, что часто наблюдается при их контрастных свойствах. В хрупких породах сдвиговые деформации имеют более локализованный характер, чем в пластичных средах. Относительное скольжение таких слоев создают сложные конфигурации разломов. Полученные результаты подтверждают, что полосы локализованного сдвига могут представлять собой различные геологические объекты, такие как разломы и трещины. Последние развиваются от дневной поверхности вглубь среды, не оказывая существенного воздействия на рельеф. Разломы пронизывают среду насквозь и формируют горные поднятия. Процесс образования разломов усложняется в случае слоистых сред, и приводит к их более сложной конфигурации.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФНИ (проект № FWZZ-2022-0021).

THE DEVELOPMENT OF LOCALIZED SHEAR BANDS IN MODELS OF HORIZONTAL CRUSTAL COMPRESSION

A. A. Tataurova^{1,*}, Y. P. Stefanov¹

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

*E-mail: tataurovaaa@ipgg.sbras.ru

УСТОЙЧИВОСТЬ СВОДА ВЫРАБОТОЧНОГО ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА

В. А. Трофимов^{1, *}, И. Е. Шиповский¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: iv_ev@mail.ru

Обрушения, связанные с подземной выработкой значительного объема горных пород, могут вызывать существенные просадки поверхности разрабатываемого массива. При этом деформации поверхности могут представлять угрозу технической инфраструктуре горнодобывающего предприятия, а также прилегающим объектам и сооружениям.

В этой связи проблема устойчивости кровли выработки требует постоянного совершенствования и соответствующей корректировки существующих методов ее укрепления для предотвращения нежелательных деформаций в горном массиве, ведущих к самообрушению, которое может трактоваться как переход системы из одного квазиравновесного состояния в другое под воздействием внутренних лавинообразно разворачивающихся процессов в режиме триггерного эффекта. Такое преобразование начинается вследствие формирования в массиве некоторого пускового сигнала, величина которого больше определенного допустимого уровня, зависящего от степени напряженности и нарушенности горной породы, связанных с ее строением и структурой.

Методика управления устойчивостью кровли выработки включает решения следующих задач: определение параметров и поддержание в устойчивом состоянии выработок при максимально возможном объеме выемки породы и полезного ископаемого; оценка устойчивости свода кровли при проектировании и корректировке режимов проведения горных работ; оценка фактического состояния кровли и прогноз ее устойчивости в процессе подвигания забоя; охрана объектов, жизненно важных для горного предприятия; проведение работ по укреплению кровли; разработка методики систематического контроля и целенаправленного воздействия на параметры и факторы, определяющие устойчивость горных пород в выработке; геомеханическое обоснование мер по ликвидации последствий нарушений устойчивости, контроль за их реализацией и оценка их эффективности; осуществление оперативного контроля за состоянием подземного выработочного пространства и прогноз нарушений устойчивости от начала проходки до погашения или консервации шахты; внедрение в производство рекомендаций по параметрам устойчивости выработки на этапе проектирования горных работ на базе геолого-маркшейдерской информации.

Опыт показывает, что недооценка важности аккуратных прогнозов таких деформаций чревата фатальными техническими авариями и серьезными экономическими издержками.

В работе представлен численный подход к моделированию деформаций горного массива. В ходе исследования разрабатывается принципиально новый путь расчетов деформаций поверхности, базирующийся на численном моделировании процесса обрушения кровли, максимально приближенного к реальным условиям. Применяется метод сглаженных частиц (SPH) с использованием упругопластической модели поведения горной породы массива с учетом накопления разрушений, основанной на принципах механики твердого деформируемого тела. Основным инструментом исследования является программный комплекс ANSYS, обеспечивающий удобный интерфейс реализации метода SPH. Анализируются фундаментальные принципы, влияющие на формирование деформаций и разрушений с целью выработки новой методики оценки рисков.

ROOF STABILITY OF THE WORKING UNDERGROUND SPACE

V. A. Trofimov^{1, *}, I. E. Shipovskii¹

¹Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: iv_ev@mail.ru

МЕХАНИКА И ГИДРОДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ, ПРИВОДЯЩИХ К ИНДУЦИРОВАННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ ПРИ ЗАКАЧКЕ ЖИДКОСТИ

С. Б. Турунтаев^{1, *}, В. Ю. Рига¹, Е. В. Зенченко¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: stur@idg.ras.ru

Разработка месторождений углеводородов, развитие геотермальной энергетики, захоронение опасных отходов и парниковых газов, извлечение метана из месторождений угля – все это приводит к воздействиям на подземные флюидные системы и сопровождается изменениями порового давления и вещественного состава подземных флюидов. Наиболее ярко реакция подземных флюидных систем на воздействие проявляется в росте сейсмической активности в районах воздействия, в сильных и даже катастрофических землетрясениях, происходящих, в том числе, в сейсмически спокойных регионах. Актуальным является вопрос об условиях, приводящих к возникновению индуцированной сейсмичности, а также о возможности по известным параметрам тектонических разломов и породного массива в целом, с учетом неопределенностей этих параметров, прогнозировать вероятность возникновения и максимальные магнитуды индуцированных землетрясений.

В докладе приводится обзор случаев возникновения сейсмических событий при воздействии на флюидные системы, анализируются наиболее проработанные модели реакции недр на изменение порового давления. Приводятся результаты численного и лабораторного моделирования влияния порового давления на относительное движение берегов разлома при закачке жидкости в пористую среду через скважину, находящуюся на некотором расстоянии от разлома. В результате проведенных расчетов удалось получить детальное представление о возможном движении разлома при переходе от асейсмического скольжения к сейсмическому под действием закачки флюида. Удалось выявить и оценить значения параметров, влияющих на процесс деформации разлома: скорости закачки жидкости и соответствующего изменения давления, критической жесткости и степени разупрочнения разлома при движении. Для того, чтобы движение стало сейсмическим, по крайней мере необходимо, чтобы длина зоны возникающего скольжения была заметно больше критической длины. Полученная картина эволюции скольжения от асейсмического к сейсмическому может быть использована на практике в дополнение к применяемой светофорной системе.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900167-1).

MECHANICS AND HYDRODYNAMICS OF PROCESSES LEADING TO SEISMICITY INDUCED BY FLUID INJECTIONS

S. B. Turuntaev^{1, *}, V. Y. Riga¹, E.V. Zenchenko¹

¹Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: stur@idg.ras.ru

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВНУТРЕННЕГО ЯДРА ЗЕМЛИ

О. А. Усольцева^{1, *}, В. М. Овчинников¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской Академии Наук, Москва, Россия

*E-mail: kriukova@idg.ras.ru

За последние несколько десятилетий благодаря исследованию внутреннего ядра с помощью объемных сейсмических волн создан ряд моделей, к сожалению, еще не до конца объясняющих динамику процессов во внутреннем ядре и на его поверхности. Наиболее распространенной является теория цилиндрической анизотропии с быстрой осью, параллельной оси вращения Земли, и силой анизотропии 1.5–3.5% во внешней части внутреннего ядра, опирающаяся на свойства сейсмических волн PKIKP, PKPbc, и с быстрой осью под углом 145 градусов к оси вращения и силой 3.3% в центральной части внутреннего ядра. Однако возможности использования этих волн ограничены и свойства внутреннего ядра остаются фрагментарными. Метод сейсмической интерферометрии [1], применяемый для поздней многочасовой коды сильных землетрясений ($M > 6.5$) при отсутствии в эти часы другого такого же сильного землетрясения, открывает новые возможности для изучения как анизотропных, так и изотропных свойств внутреннего ядра. Суть метода состоит в построении волнового поля на основе кросс-корреляции записей со всех возможных различных пар приемников в полосе периодов 15–50 с. Уникальность подхода заключается в интерпретации колебания, зафиксированного одним из приемников, как если бы источник располагался в месте расположения другого приемника, и при этом географическая привязка самого землетрясения никакой существенной роли не играет. Такой подход позволяет зондировать те области внутреннего ядра, которые не были просвечены с использованием данных других сейсмических волн.

В качестве экспериментального материала использованы данные сейсмических станций региональных сетей Японии, США, Монголии, Финляндии, а также общемировых сетей II и IU, зарегистрировавших сильное землетрясение в Охотском море 24 мая 2013 г. Кросс-корреляционный анализ коды (модельной и реальной) для пар станций, удаленных друг от друга не более чем на 20 градусов, позволил обнаружить метастабильные возмущения, соответствующие разности двух прямых волновых полей. Эта разность является аналогом волны PKIKPPKIKP (I2), вышедшей из источника, совпадающего с одной из станций, прошедшей насквозь через все оболочки Земли, отраженной вблизи антипода и вернувшейся обратно на другую станцию. Время пробега I2 равно ~ 2400 с.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122040400015-5).

Литература

1. Costa de Lima T., Tkalčić H., Waszek L. A new probe into the innermost inner core anisotropy via the global coda-correlation wavefield // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2022 Vol. 127. P. e2021JB023540. <https://doi.org/10.1029/2021JB023540>

APPLICATION OF THE SEISMIC INTERFEROMETRY METHOD TO THE STUDY OF THE EARTH'S INNER CORE

O. A. Usoltseva^{1, *}, V. M. Ovtchinnikov¹

¹Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: kriukova@idg.ras.ru

ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ЭТАПОВ ФОРМИРОВАНИЯ И КИНЕМАТИКИ КАРКАСА РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ ТУЮКАНСКОГО РУДНОГО УЗЛА (ИРКУТСКАЯ ОБЛАСТЬ) НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

С. А. Устинов¹*, А. Д. Свечеревский¹, А. М. Чепчугов¹, В. А. Петров¹, Е. В. Яровая¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: stevesa@mail.ru

Для района Туюканского рудного узла, расположенного в России в Мамско-Чуйском районе Иркутской области и определённого в качестве перспективного на обнаружение новых урано-, золото- и железорудных объектов, на основе геоинформационных технологий и обработки данных дистанционного зондирования Земли применен оригинальный подход, включающий структурно-геоморфологические, пространственно-геометрические, пространственно-плотностные и тектонофизические методы для выявления специфических стадий развития каркаса разрывных нарушений, определяющих размещение рудной минерализации. На основе сравнения ориентировок региональных разрывных нарушений древнего заложения и неотектонических разрывных структур установлена их унаследованность. Это позволяет использовать морфологические особенности рельефа для достоверной реконструкции каркаса как неотектонических, так и древних разрывных нарушений, участвовавших в процессе миграции рудоносных флюидов, восстановления кинематики перемещений в зонах основных разломов как на этапе заложения, так и в результате последующих активизаций. На основе модели развития вторичных структур в зоне скола П. Л. Хэнкока и установленных разрывных нарушений реконструированы параметры (ориентировки главных осей) регионального поля напряжений-деформаций, а также кинематика основных типов разрывов. Магистральные разломы северо-восточной ориентировки, субпараллельные границе Сибирской платформы и Саяно-Байкальской складчатой области, характеризуются как правые сдвиги при ориентировке оси сжатия 90° . Разломы северо-западной ориентировки являются левыми сдвигами. Системы разломов субмеридионального простирания представляют взбросы. Структуры отрыва субпараллельны оси максимального сжатия и ориентированы субширотно. Расчет тенденции к сдвигу с учетом установленной ориентировки главных осей регионального поля напряжений-деформаций позволил выявить наиболее гидравлически активные сегменты разрывных структур, которые характеризуются преимущественно северо-восточной и северо-западной ориентировками.

В пределах зон динамического влияния выявленных разрывов реконструированы параметры локальных полей напряжений-деформаций, а также стадийность формирования данных структур. Северо-западные разломы сформировались на первой стадии как левые сдвиги при восток-северо-восточной ориентировке оси максимального сжатия. Вторая стадия отражает заложение магистральных разломов северо-восточного простирания правосторонней кинематики, субширотных отрывов и субмеридиональных взбросов при субширотной ориентировке оси максимального сжатия. Третья стадия связана с формированием север-северо-западных левых сдвигов при северо-западной ориентировке оси максимального сжатия локального поля напряжений-деформаций.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 24-27-00218).

TECTONOPHYSICAL RECONSTRUCTION OF THE STAGES OF FORMATION AND KINEMATICS OF THE FRAMEWORK OF FAULTS OF THE TUYUKAN ORE CLUSTER (IRKUTSK REGION) BASED ON EARTH REMOTE SENSING DATA

S. A. Ustinov¹*, A. D. Svecherevskiy¹, A. M. Chepchugov¹, V. A. Petrov¹, E. V. Yarovaya¹

¹Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: stevesa@mail.ru

РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ИЗМЕРЕНИЙ ДОННЫХ И ПЛАТФОРМЕННЫХ ИНКЛИНОМЕТРОВ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ СЕВЕРНОГО КАСПИЯ

Е. А. Фаттахов^{1, *}

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

*E-mail: anhair06@gmail.com

Представлены результаты сопоставительного анализа данных, полученных платформенными и донными инклинометрами на месторождении им. В. Филановского. Детальный пространственно-временной анализ показал, что спектры наклонов, полученных платформенными инклинометрами, принципиально не совпадают с данными донных сенсоров. Полученные результаты наглядно демонстрируют, что система инструментальных наблюдений, организованная на месторождении им. В. Филановского, позволяет одновременно проводить два типа мониторинга: геотехнический и геодинамический.

Геотехнический мониторинг осуществляется с помощью инклинометров, акселерометров и приемников ГНСС, установленных на платформе. Совокупность установленных датчиков позволяет регистрировать колебания платформ и расположенных на них сооружений в реальном масштабе времени и широком частотном диапазоне внешних воздействий. Геодинамический мониторинг проводится системой донных сейсмометрических и инклинометрических станций, расположенных на морском дне в непосредственной окрестности от добывающей платформы. Донные станции позволяют осуществлять мониторинг современного геодинамического состояния недр, которое, как известно представляет собой аномальные деформационные и сейсмические процессы природного или техногенного генезисов. Оказалось, что платформенные инклинометры уверенно фиксируют экзогенные деформационные воздействия, а донные станции адекватно регистрируют изменения аномальных деформаций морского дна, индуцированные режимом разработки месторождения. Это подтверждается результатами геомеханического моделирования интенсивной закачки жидкости в пласт, которое привело к аномальным наклонам морского дна. Оценки, проведенные с использованием модели пороупругого включения, показали соответствие расчетных и наблюдаемых параметров. Именно поэтому шельфовые месторождения, оборудованные только платформенными системами мониторинга деформационных процессов, не соответствуют нормативным требованиям Ростехнадзора, предъявляемым к системам геодинамического мониторинга, которые направлены на обеспечение рационального и безопасного недропользования.

THE RESULTS OF A COMPARATIVE ANALYSIS OF MEASUREMENTS OF BOTTOM AND PLATFORM INCLINOMETERS AT THE NORTH CASPIAN FIELD

E. A. Fattakhov^{1, *}

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: anhair06@gmail.com

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСА ИНФРАЗВУКОВЫХ И СЕЙСМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РЕГИСТРАЦИИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СНЕЖНЫХ ЛАВИН В ХИБИНСКОМ ГОРНОМ МАССИВЕ

А. В. Федоров¹, *, В. Э. Асминг¹, И. С. Федоров¹

¹Кольский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Апатиты, Россия

*E-mail: Afedorov@krsc.ru

С 2018 г. в Кольском филиале Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» ведутся эксперименты по регистрации снежных лавин методами дистанционных геофизических измерений. С 2020 г. на территории Хибинского горного массива функционирует экспериментальный комплекс инфразвукового мониторинга лавинной активности.

Принцип мониторинга лавинной активности базируется на регистрации низкочастотных (инфразвуковых) акустических колебаний, генерируемых движением снежной массы по склону. Комплекс представляет из себя пространственную антенну из четырех чувствительных низкочастотных микрофонов с апертурой 200 метров.

За три года эксплуатации комплекс подтвердил способность регистрировать относительно крупные снежные лавины объемом порядка 5 тысяч кубических метров на удалении до 7 км и малые снежные лавины объемом от 0.5 тысячи кубических метров на удалении 2.5 км.

Процесс сбора и обработки данных полностью автоматизирован. Создано специальное программное обеспечение обнаружения инфразвуковых сигналов и оценки их параметров, таких как длительность и изменение направления на источник. Эта пара параметров является базовой для отбора сигналов претендентов на источник лавинной активности. По результатам работы данной программы формируются автоматические бюллетени возможных проявлений лавинной активности, в дальнейшем анализируемых специалистом интерпретатором.

Продолжение данных работ заключается в построении полностью автоматической системы распознавания сигналов, порожденных снежными лавинами, и их дискриминация от сигналов не целевой природы. Для этих целей, в том числе, планируется оснастить комплекс широкополосной сейсмической станцией. Совместный анализ сейсмических и инфразвуковых записей позволит отбраковывать инфразвуковые сигналы, генерируемые техногенными источниками, такими как промышленные взрывы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 24-27-20007).

APPLICATION OF A COMPLEX OF INFRASOUND AND SEISMIC REGISTRATION METHODS FOR MONITORING SNOW AVALANCHES IN THE Khibiny MOUNTAIN RANGE

A. V. Fedorov¹, *, V. E. Asming¹, I. S. Fedorov¹

¹Kola branch of the Federal Research Center «Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences», Apatity, Russia

*E-mail: Afedorov@krsc.ru

РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА УДАРООПАСНОГО МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД НИКОЛАЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Д. И. Цой¹*, В. А. Луговой¹, М. И. Рассказов¹, А. А. Терешкин¹

¹Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ХФИЦ ДВО РАН, Хабаровск, Россия

**E-mail: denis.tsoi@mail.ru*

Сложную пространственно-временную структуру нестационарного деформационного поля земной коры создают различные физические процессы, происходящие на поверхности и в недрах планеты, проявляемые в виде сейсмических, собственных, приливных, сезонных и техногенных колебаний Земли. Все они могут служить триггером как для горных ударов, так и для землетрясений, в том числе и техногенного происхождения. В прикладном плане исследование деформационных колебаний тесно связано с проблемами катастрофических явлений: землетрясения, горные удары, вулканическая активность и т.д. Понимая важность и необходимость использования в исследованиях деформационных процессов высокоточной аппаратуры, для обеспечения безопасных условий работы в подземных выработках и комплексного геомеханического мониторинга удароопасности был разработан и внедрен на Николаевском полиметаллическом месторождении (Приморский край, г. Дальнегорск) проект деформационной системы «Prognoz-D», реализованный совместно с коллегами из Тихоокеанского Океанологического института (г. Владивосток), в составе: однокоординатного лазерного деформометра и системы сбора, хранения и передачи информации. В статье представлены первичные экспериментальные результаты исследования деформационного поля Николаевского месторождения. Особый интерес, в прикладном плане, вызывает регистрация аномальных смещений («толчков» массива), наблюдение предвестников этих смещений и релаксационных процессов в массиве. Отмечено, что аномальные смещения наблюдались на фоне крупных удаленных землетрясений, зарегистрированных деформометром – в районе острова Минданао (Филиппины), недалеко от г. Цинхай (Китай), западного побережья Хонсю (Япония), Кыргызстане и других. Дальнейшие работы по интерпретации результатов измерений планируется провести с целью: выявления блочного строения зоны контроля; определения резонансных характеристик блоков и регистрации изменений этих характеристик; определения первоисточников колебаний с разделением их на местные и удаленные - с дальнейшим отслеживанием изменений их параметров; выделения физических процессов, которые на резонансной основе могут действовать на выделенные блоки и определения степени их влияния на региональные колебательные процессы.

RESULTS OF GEODYNAMIC MONITORING OF THE ROCK BURST-HAZARDOUS ROCK MASS OF THE NIKOLAEVSKOE DEPOSIT USING LASER INTERFEROMETRY

D. I. Tsoi¹*, V. A. Lugovoy¹, M. I. Rasskazov¹, A. A. Tereshkin¹

¹Institute of Mining Engineering of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences – a separate division of the KhFRC FEB RAS, Khabarovsk, Russia

**E-mail: denis.tsoi@mail.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОСТРУКТУРЫ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИМОРСКОГО РАЗЛОМА БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

В. Е. Чинкин^{1, *}, А. А. Остапчук¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук

*E-mail: koladik@gmail.com

В работе исследованы статистические закономерности разрушения шлифов горных пород в масштабах 10^{-5} – 10^{-2} м, слагающих центральную зону Приморского разлома Байкальской рифтовой зоны. Исследование проводилось на основе цифрового метода сегментации. Каждый шлиф содержал примерно 10 тыс объектов. Для каждого сегмента были посчитаны площади, центры масс и направления, соответствующие направлению главной оси эллипса инерции. В работе анализировались статистики этих характеристик с учетом погрешности. Оценка погрешности проводилась методом Монте-Карло.

Метод сегментации объединял два различных подхода к задаче выделения границ. Первый подход состоял из метода СММА, разработанный ИГЕМ РАН, и последующей интерпретации линияментов как границ элементов. Второй подход представлял собой применение многослойной сверточной сети RSF к фотографии шлифа и последующей интерпретации результата как вероятностной карты границ объектов.

Проводился анализ статистик площадей. Сравнивалось какое из наиболее распространенных распределений наилучшим образом может описывать данную статистику. Исследовались логнормальное распределение, распределение Вейбула и степенное распределение. В результате анализа статистик площадей выявлено, что с учетом погрешности большинство шлифов может быть описано логнормальным распределением.

Были вычислены интегральные характеристики шлифов, в том числе параметры логнормального распределения. Методом ближайшего соседа проведена оценка энтропии распределения объектов по направлению и координате. Прослежены закономерности изменения интегральных характеристик шлифов вдоль профилей вкрест простирания разлома. Ядро разлома выявлялось по данным электрического зондирования. Оказалось, что для горных пород, расположенных в близких геологических условиях, можно выделить статистически значимые зависимости по мере удаления от ядра разломной зоны и даже явно проследить особенности характеристик ядра разлома.

INVESTIGATION OF STATISTICAL CHARACTERISTICS OF MICROSTRUCTURE OF ROCK SAMPLES OF THE PROMORSKY FAULT OF BAIKAL RIFT ZONE

V. E. Chinkin^{1, *}, A. A. Ostapchuk¹

¹Sadovsky Institute for Dynamics of Geospheres of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: koladik@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА С ПРОТЯЖЕННЫМ НАРУШЕНИЕМ МАССИВА В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Т. К. Чумаков^{1, *}

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия

*E-mail: chumakov.tk@idg.ras.ru

В данной работе представлены результаты экспериментов по изучению взаимодействия гидроразрыва с ранее существовавшей трещиной. Отличительной особенностью проведенных экспериментов является возможность использования ультразвукового мониторинга для измерения распространения и раскрытия трещины одновременно с измерениями порового давления в нескольких точках пористого насыщенного образца. Это позволяет нам получать распределения давления на различных этапах эксперимента и устанавливать связь между распределением порового давления, распространением гидроразрыва и его взаимодействием с макроскопическими естественными трещинами. Возможности активного ультразвукового мониторинга были расширены благодаря предварительным калибровочным экспериментам, которые позволяют оценить раскрытие трещины посредством ослабления ультразвуковых импульсов. Эксперимент продемонстрировал наиболее сложный сценарий взаимодействия трещин, когда гидравлический разрыв пересекался с естественным разрывом, который вблизи пересечения выходил на границу образца. Дополнительные осложнения возникают из-за расположения трещины: гидроразрыв был нормальным по отношению к плоскости основания, в то время как естественный разлом был наклонным. Это привело к постепенному увеличению зоны пересечения по мере распространения гидроразрыва.

Представленный эксперимент показывает, что естественный разлом ограничивает распространение гидравлического разрыва. Это вызвано утечкой жидкости для гидроразрыва пласта в естественную трещину. Обе трещины образовали единую гидравлическую систему, которая почти одновременно отреагировала на повторное открытие гидроразрыва, но ширина естественной трещины уменьшалась с увеличением общего расстояния от ствола нагнетательной скважины. Наш эксперимент продемонстрировал наиболее сложный сценарий взаимодействия трещин, когда гидравлический разрыв пересекал естественную трещину.

INVESTIGATIONS OF THE INTERACTION OF A FRACTURE WITH AN EXTENDED MASSIF DISTURBANCE UNDER LABORATORY CONDITIONS

T. K. Chumakov^{1, *}

¹Moscow Institute of Physics and Technology, MIPT, Phystech, Moscow, Russia

*E-mail: chumakov.tk@idg.ras.ru

СТРОЕНИЕ ЛИТОСФЕРЫ ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА ПО НОВЫМ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ

А. В. Шаповалов^{1,*}, А. Г. Гоев¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского, Москва, Россия

*E-mail: andrewsh20@mail.ru

Воронежский кристаллический массив (ВКМ) располагается в северной части протократона Сарматия Восточно-Европейской платформы (ВЕП). В нем, в свою очередь, выделяются три главных тектонических элемента – мегаблоки Курской магнитной аномалии (КМА), представленные гранито-гнейсовыми блоками архейской консолидации, с явно выраженными компонентами поднятий и сдвигов и Хоперский, сложенный в большей степени породами Воронцовской серии, осложненными магматогенными образованиями. Мегаблоки разделены Лосевской шовной зоной, представляющей собой активную континентальную окраину. Граничными признаками Лосевской шовной зоны служат: степень метаморфизма и устойчивые ассоциативные признаки, достаточно уверенно распознаваемые в геофизических полях. Сложная внутренняя тектоника, а также наличие и активная разработка железорудных месторождений КМА требуют изучения особенностей строения ВКМ.

На территории ВКМ, начиная с октября 2017 г. открыты и действуют две широкополосные сейсмические станции Единой геофизической службы РАН (ФИЦ ЕГС РАН) – «Сторожевое» (VSR) и «Новохоперск» (VRH). Сейсмические станции укомплектованы широкополосными сейсмическими датчиками СМЗ-ОС с частотным диапазоном 0.02–50 Гц, а также отечественными регистраторами Ugra. Станции расположены в различных тектонических элементах ВКМ (Лосевской шовной зоне и Хоперском блоке), что позволяет провести качественное сопоставление строения литосферы этих элементов. Для восстановления кинематического строения литосферы был использован метод функций приемника (RF), основанный на анализе данных обменных волн, сформировавшихся на контрастных сейсмических границах в районах мест установки сейсмических станций.

В процессе применения метода RF были использованы записи телесейсмических событий, магнитуды более 5.5 и находящиеся на эпицентральных расстояниях 40–100 градусов. Методика расчета индивидуальных функций приемника хорошо известна. При решении обратной задачи был использован метод Левенберга – Маркварда. Было сгенерировано по 100 000 случайных начальных моделей, состоящих из тринадцати слоев, свободными параметрами в которых являлись: скорости поперечных волн, отношение скоростей продольной и поперечных волн, а также мощность каждого слоя. Для стабилизации инверсии скорости на глубине 300 км фиксировались на значениях согласно модели IASP91. Медианные модели по 1% лучших минимизированных начальных моделей являлись искомыми решениями. По результатам моделирования земная кора может быть представлена четырьмя слоями, что подтверждается проведенными ранее на этой территории исследованиями ГСЗ и МОБЗ, а также геологическим строением Хоперского мегаблока. Определяется волновод с выраженной подошвой на глубине 30 км для станции VSR и 34 км для станции VRH. Скоростное строение верхней мантии для двух полученных моделей существенно различается. Для станции VRH выявляется выраженный слой пониженных скоростей на глубинах около 110–150 км, который никак не проявляется в модели для станции VSR. Выявленный слой маркирует *mid-lithospheric discontinuity* (MLD).

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122040400015-5).

VORONEZH CRYSTALLINE MASSIF LITOSPHERIC STRUCTURE IN ACCORDING TO NEW SEISMOLOGICAL DATA

A. V. Shapovalov^{1,*}, A. G. Goev¹

¹Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: andrewsh20@mail.ru

СТАБИЛИЗАЦИЯ РЕЖИМА СКОЛЬЖЕНИЯ ГЛИНОСОДЕРЖАЩИХ ТРЕЩИН ПРИ ОБВОДНЕНИИ

И. В. Шатунов^{1, 2, *}

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», Долгопрудный, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: shatunov.iv@phystech.edu

Фрикционное поведение трещин, заполненных гранулированным материалом, в значительной степени определяется структурой и свойствами самого материала. Незначительное изменение вещественного состава, гранулометрии и степени увлажнения может привести к радикальному изменению режима скольжения. В ходе исследования состава и строения множества разломных зон выявлено широкое распространение аутигенных глинистых минералов в их ядрах, при этом фрикционные свойства глин существенно изменяются при их обводнении. Обводнение глиносодержащих трещин и разломов может обуславливать стабилизацию режима их скольжения.

Для изучения характера стабилизации режима скольжения глиносодержащих трещин была проведена серия экспериментов на установке слайдер-модели, в которой блок под действием нормального и сдвигового усилий скользит вдоль межблокового контакта, сложенного песчано-глинистой смесью. В ходе экспериментов были рассмотрены наиболее распространенные типы глин – бентонитовая (монтмориллонитовая), гидрослюдистая и каолининовая.

В сухих условиях для всех типов глин при увеличении глиносодержания всегда наблюдается стабилизация скольжения при массовой доле глиняной компоненты более 20%. При влагонасыщении фрикционное поведение глиносодержащих модельных трещин существенно зависит от минералогии глин. Так, при относительном 5%-ном содержании бентонитовой компоненты увлажнение приводит к стабилизации скольжения трещины, в то время как в случае гидрослюд наблюдается увеличение скорости проскальзывания более чем на порядок. Для увлажненных гидрослюдистых глин в условиях проведения экспериментов стабилизация скольжения происходила при относительном содержании 20%.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 22-17-00204).

STABILIZATION OF THE SLIDING MODE OF CLAY-CONTAINING CRACKS DURING HYDRATION

I. V. Shatunov^{1, 2, *}

¹Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

²Sadovsky Institute for Dynamics of Geospheres of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: shatunov.iv@phystech.edu

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ И ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

П. Н. Шебалин¹, *

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: p.n.shebalin@gmail.com

В докладе демонстрируется, что современные карты общего сейсмического районирования, основанные на вероятностном анализе сейсмической опасности за 25 лет после создания, в целом успешны, но допущено ряд пропусков сильных землетрясений и одновременно 4–5 кратное завышение опасности на больших территориях.

Главный источник ошибок состоит в устаревшем подходе к моделированию зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ), включающем слишком много субъективных факторов. Предлагаются пути совершенствования моделей зон ВОЗ, а также методы и критерии оценки их качества. Вероятностный подход был изначально нацелен на расчеты сейсмического риска, то есть оценки ожидаемых человеческих или экономических потерь. На оценки риска опираются системы страхования и перестрахования от стихийных бедствий.

В России в масштабах страны оценки сейсмического риска в настоящее время не проведены и система страхования фактически не работает. Одной из важнейших и пока нерешенных проблем оценки сейсмической опасности является нестационарность сейсмического процесса. Это делает относительно надежными оценки сейсмической опасности на основе вероятностного подхода, рассчитанные на 50 лет.

Такие оценки используются в общем гражданском строительстве. Для ответственных объектов применяются оценки минимум на 500 лет. В этом случае вероятностные оценки могут служить лишь основанием для необходимости проведения детального сейсмического районирования (ДСР). ДСР необходимо применять также в районах возможных катастрофических землетрясений. Развитие ДСР необходимо вести как в направлении усовершенствования моделей затухания сейсмических волн, вплоть до моделирования конкретных потенциальных землетрясений на конкретные сооружения, так и развития методов оценки сейсмического потенциала геологических структур методами тектонофизики, спутниковой геодезии и интерферометрии.

Прогноз землетрясений для применения превентивных мер пока не возможен, но может использоваться для разработки зависящих от времени оценок сейсмической опасности в масштабе нескольких лет. Методы комплексирования прогнозов землетрясений и моделей сейсмического режима на основе статистики ошибок двух родов для фиксированного прогнозного алгоритма уже существуют.

STOCHASTIC AND DETERMINISTIC APPROACHES TO SEISMIC RISK ASSESSMENT

P. N. Shebalin¹, *

¹Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics RAS, Moscow, Russia

*E-mail: p.n.shebalin@gmail.com

ВЫДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ В АТМОСФЕРЕ ПРИ ПАДЕНИИ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ РАЗМЕРОМ 20–200 МЕТРОВ

В. В. Шувалов^{1, *}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: shuvalov@idg.ras.ru

При изучении движения метеороидов в планетных атмосферах одним из ключевых вопросов является определение энерговыделения в атмосфере. От этого энерговыделения зависят параметры ударной волны, которая доходит до поверхности планеты и может вызвать разрушения, и интенсивность наблюдаемой световой вспышки, а также параметры ударного кратера, если метеороид долетает до поверхности Земли. В процессе разрушения, испарения и торможения метеороида в воздухе происходит сложное перераспределение энергии между твердым веществом, парами и воздухом, которое не описывается приближенными полуаналитическими моделями и требует более детального численного моделирования течения вокруг разрушающегося тела. Более того, само понятие энерговыделения в атмосфере требует пояснения. После полного испарения метеороида (и, казалось бы, полной передачи энергии метеороида воздуху на соответствующих высотах) образуется высокоскоростная струя (со скоростью, близкой к начальной скорости метеороида), которая продолжает лететь вниз и, соответственно, переносит энергию на более низкие высоты. Окончательная передача энергии воздуху происходит не там, где тормозится и испаряется метеороид (или его фрагменты), а там, где тормозится эта высокоскоростная струя. Целью данной работы является детальное изучение перераспределения энергии между твердым веществом, парами и воздухом и между разными ее формами (т.е. между кинетической и тепловой) в процессе фрагментации, абляции и торможения метеороидов размером от нескольких десятков метров до нескольких сотен метров в атмосфере Земли. Определяются доля энергии метеороида, теряемая при пролете через атмосферу, и высоты, на которых это происходит.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900176-3).

ENERGY RELEASE IN THE ATMOSPHERE DURING THE FALL OF COSMIC BODIES RANGING IN SIZE FROM 20 TO 200 METERS

V. V. Shuvalov^{1, *}

¹Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: shuvalov@idg.ras.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫХОДА ГАЗА С ПОВЕРХНОСТИ ДНА

Н. А. Юдочкин¹ *, А. А. Таирова¹, Г. В. Беляков¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: rood818181@gmail.com

Актуальность изучения севера Российской Федерации обусловлена богатыми запасами природных ресурсов и расположением северного морского пути. Особый приоритет в изучении данного вопроса в Российской Федерации основан на протяженной границе с северным ледовитым океаном в 19 тыс км. Таким образом, исследование данного региона решает прикладные и научные задачи, от исследования климатических изменений планеты при помощи кернов льда [1] до изучения выхода метана с поверхности дна [2].

Изучение выхода углеводородных газов с поверхности дна является важным вопросом разведки и извлечения углеводородов, так как данный газ является спутником нефтяных и газоконденсатных месторождений [3]. Формирование газогидратов происходит при смене климатических условий, связанных с чередованием оледенения и оттаивания поверхности земли. При промерзании грунтов, содержащих воду и газ, происходит образование клеточного льда, имеющего форму сложного многогранника, состоящего из молекулы газа окруженной молекулами воды [1].

Клеточный лед является сложной структурой, которая зависит от термобарических условий и может образовываться при давлении, превышающем 10 атм и температуре ниже -10°C ; с повышением температуры до -2°C давление, необходимое для образования данной структуры, возрастает в 3 раза. В настоящее время благодаря многолетним измерениям температуры был выявлен положительный тренд, который также затронул Северный Ледовитый океан. Увеличение температуры воды изменило термобарические условия в морских донных осадках, что привело к появлению на дне сипов. В представленной работе на примере физического эксперимента рассматриваются условия выхода газа на поверхность морского дна через толщу рыхлых осадочных отложений. В физической модели в качестве донных отложений использовался насыщенный песок, а вместо углеводородного газа использовался воздух. Под действием градиента давления воздух фильтруется через пористую структуру и выходит на поверхность, образуя газовый сип.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 22-67-00025).

Литература

1. Нефтяная геология, гидрогеология и геотехника Юга России : Сборник научных трудов. Вып. 3. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Кубанский государственный университет. Краснодар : Кубанский гос. ун-т. 2023. – 241 с.
2. Богоявленский, В.И. Мерзлота, газогидраты и сипы газа в центральной части моря Лаптевых // Доклады РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 500. № 1. С. 70–76. <https://doi.org/10.31857/S2686739721090048>
3. Лурье М.А., Шмидт Ф.К. Попутный нефтяной газ. Его источник, ресурсы, использование // Известия вузов. Нефть и газ. 2018. № 3.

EXPERIMENTAL MODELING OF GAS RELEASE FROM THE BOTTOM SURFACE

N. A. Iudochkin¹ *, A. A. Tairova¹, G. V. Belyakov¹

¹Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Science, Moscow, Russia

*E-mail: rood818181@gmail.com

ВАРИАЦИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ И ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ В УНЧ ДИАПАЗОНЕ В ПЕРИОДЫ СОВПАДЕНИЯ ВО ВРЕМЕНИ БЛИЖНЕЙ ГРОЗЫ И ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Н. В. Ягова^{1,4,*}, Я. А. Сахаров^{2,4}, В. Н. Селиванов³, В. А. Пилипенко^{1,4}

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

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

³Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, Апатиты, Россия

⁴Геофизический центр Российской Академии Наук, Москва, Россия

*E-mail: nyagova@yandex.ru

Воздействие геоиндуцированных токов (ГИТ) на электрооборудование связано прежде всего с их воздействием на трансформаторы. Факторами риска являются не только амплитуды ГИТ, но также время существования однополярного ГИТ заданной амплитуды и вероятность совпадения во времени ГИТ с переходным режимом в трансформаторе, возникающим как при штатных переключениях нагрузки, так и при аварийных ситуациях. Молниевый разряд является источником электромагнитного поля в широком диапазоне частот и вызывает сбои в работе электрооборудования. Это ставит вопрос о параметрах ГИТ при совпадении по времени грозы и геомагнитного возмущения. Для высоких широт грозовая активность модулируется солнечной [1]. На параметры атмосферы влияют также выбросы энергичных частиц, возникающие при геомагнитных возмущениях, но связь между геомагнитной и грозовой активностью не исследована с достаточной для приложений точностью. В настоящей работе рассматривается связь грозовой активности на севере РФ с параметрами космической погоды. Для отдельных событий и в статистике исследуются параметры ГИТ в условиях, когда молниевые разряды регистрировались вблизи ЛЭП «Северный транзит» на фоне высокой геомагнитной активности. Для анализа используются данные ГИТ на станции Выходной в течение нескольких лет на разных фазах 24 и начала 25 солнечных циклов, индексы глобальной геомагнитной и авроральной активности и измерения геомагнитного поля на ближайших к точке измерения ГИТ станциях сети IMAGE и на спутниках.

Исследования выполнены в рамках государственных заданий ГЦ РАН и ЦЭС КНЦ РАН.

Литература

1. Физика космических лучей. Москва : Изд-во Моск. ун-та. 1970. – 285 с.

VARIATIONS OF GEOMAGNETIC FIELD AND GEOMAGNETICALLY INDUCED CURRENTS IN THE ULF FREQUENCY BAND DURING PERIODS OF COINCIDENCE IN TIME OF A NEARBY THUNDERSTORMS AND GEOMAGNETIC DISTURBANCES

N. V. Yagova^{1,4,*}, Y. A. Sakharov^{2,4}, V. N. Selivanov³, V. A. Pilipenko^{1,4}

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia

³Northern Energetics Research Center, Apatity, Russia

⁴Geophysical Center of the Russian Academy, Moscow, Russia

*E-mail: nyagova@yandex.ru