

Министерство науки и высшего образования РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ДИНАМИКИ ГЕОСФЕР ИМЕНИ АКАДЕМИКА М.А. САДОВСКОГО
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

VIII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ГЕОСИСТЕМАХ

18-22 мая 2026 г., г. Коломна

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Москва

УДК 550.3; 550.8; 551.2; 551.3

Триггерные эффекты в геосистемах: тезисы докладов VIII Международной конференции (18–22 мая 2026 г., г. Коломна, Московская область). М. : ИДГ РАН, 2026. – 276 с.

В сборнике содержатся тезисы докладов, представленных на VIII Международной конференции «Триггерные эффекты в геосистемах» (18–22 мая 2024 г., Коломна, Московская область) и прошедшего в рамках конференции воркшопа по Адаптивной оптике. 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».

ОРГАНИЗАТОР:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук (ИДГ РАН)

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ ОРГКОМИТЕТА: Г. Г. Кочарян – д.ф.-м.н., профессор, ИДГ РАН

ЗАМ. ПРЕДСЕДАТЕЛЯ ОРГКОМИТЕТА: Л. М. Богомолов – д.ф.-м.н., ИМГиГ ДВО РАН, А. А. Остапчук – к.ф.-м.н., ИДГ РАН

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ОРГКОМИТЕТА: К. Г. Морозова – к.ф.-м.н., ИДГ РАН

Члены Оргкомитета:

А. Н. Беседина – к.ф.-м.н., ИДГ РАН

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

Н. Л. Вяткин – д.э.н., к.т.н. АНО НОИВ

А. Д. Завьялов – д.ф.-м.н., ИФЗ РАН

С. Н. Куличков – д.ф.-м.н., ИФА РАН

С. В. Лавриков – д.ф.-м.н., ИГД СО РАН

М. Г. Леонов – д.г.-м.н., ГИН РАН

Л. И. Лобковский – д.ф.-м.н., академик РАН, ИО РАН

В. О. Михайлов – д.ф.-м.н., академик РАН, ИФЗ РАН

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

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

В. В. Ружич – д.г.-м.н., ИЗК СО РАН

В. Б. Смирнов – д.ф.-м.н., МГУ

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

П. Н. Шебалин – чл.-корр. РАН, ИТПЗ 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

А. Н. Ляхов – к.т.н., ИДГ РАН – зам. председателя

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

В. В. Жмур – чл.-корр. РАН, ИО РАН

Ю. И. Зецер – д.ф.-м.н., ИДГ РАН

В.Н. Иванов – к.ф.-м.н., НПО «Тайфун» Росгидромета

Ю.О. Кузьмин – д.ф.-м.н., ИФЗ РАН

Л.А. Назаров – д.ф.-м.н., ИГД СО РАН

Ю. Л. Ребецкий – д.ф.-м.н., ИФЗ РАН

И.А. Ряховский – к.ф.-м.н., ИДГ РАН

А.А. Соловьев – д.ф.-м.н. чл.-корр. РАН, ГЦ РАН А. А.

Спивак – д.ф.-м.н., ИДГ РАН

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

Ответственный редактор: д.ф.-м.н. Г. Г. КОЧАРЯН

СОДЕРЖАНИЕ

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕРАТИВНОЙ МОДЕЛИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ СИНТЕЗА МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ ФОРМ ПРИ ОГРАНИЧЕННОМ ОБЪЕМЕ ДАННЫХ <i>И. А. Абзалилов</i>	12
АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЛИТОСФЕРЫ КАВКАЗА НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ <i>Д. Ж. Акматов, В. Н. Татаринов</i>	13
КОСЕЙСМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ТЕЛЕСЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ <i>И. М. Алешин, А. А. Соловьев, А. Г. Гоев, Д. В. Кудин</i>	15
РОИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАК ИНДИКАТОР ПОДЛЕДНОЙ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В ЗАПАДНОЙ АНТАРКТИДЕ <i>Н. В. Андреева, А. А. Баранов</i>	17
РЕАКЦИЯ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА НЕЛИНЕЙНЫЕ ДЛИННЫЕ ВОЛНЫ В ОКЕАНЕ <i>С. А. Арсеньев</i>	19
ПОЗДНЕКАЙНОЗОЙСКОЕ ПОДНЯТИЕ ГОР ГАМБУРЦЕВА В РЕЗУЛЬТАТЕ ОТРЫВА ЛИТОСФЕРНОГО КОРНЯ <i>А. А. Баранов, Л. И. Лобковский, А. М. Бобров, А. Н. Марков</i>	21
СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ ПРИ РОСТЕ ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ <i>Н. А. Барышников, С. Б. Турунтаев</i>	23
ОЦЕНКИ МЕХАНИЗМОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ГЕОМАГНИТНО ИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ В ЛЭП НА ОСНОВЕ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА 11 ЛЕТ <i>В. Б. Белаховский, В. А. Пилипенко, В. Н. Селиванов, Я. А. Сахаров</i>	25
ГЕТЕРОГЕННОСТЬ СЛЭБА КАК ВАЖНЫЙ ПАРАМЕТР ФОРМИРОВАНИЯ ВУЛКАНИЗМА КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ОСТРОВНОЙ ДУГИ <i>О. В. Бергаль-Кувикас</i>	27
ПОВТОРЯЮЩИЕСЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ <i>А. Н. Беседина, Ц. А. Тубанов</i>	29
РЕЗУЛЬТАТЫ НА ОСНОВЕ СЕЧЕНИЙ ТОМОГРАФИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СОВРЕМЕННОЙ ЗЕМЛИ: ГРАНИЦЫ В НИЖНЕЙ МАНТИИ; ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ <i>А. М. Бобров, Л. И. Лобковский, А. А. Баранов</i>	30
КВАНТОВЫЙ ТРИГГЕР: ОСОБЕННОСТИ МЕТОДОЛОГИИ И ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ <i>Л. М. Богомолов, В. Н. Сычев</i>	32
ГЛУБОКИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ СРЕДНЕЙ АЗИИ <i>В. Ю. Бурмин, Г. Р. Петросян</i>	34
ПРИМЕНЕНИЕ ГНСС-ТЕХНОЛОГИИ (GPS/ГЛОНАСС) В ГЕОЛОГИИ <i>М. С. Бурханов, Д. Кеита</i>	35
АНАЛИЗ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛЕЙ СМЕЩЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ РСА ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ В РАЙОНЕ ВОСТОЧНОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО ПОЯСА ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА ПОСЛЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 29.07.2025 г. <i>М. С. Волкова, В. О. Михайлов</i>	37

ИНДИКАТОРЫ ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОЙ СТАДИИ ПОДГОТОВКИ КАМЧАТСКОГО МЕГАЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 29.07.2025 г. <i>В. А. Гаврилов, Ю. Ю. Бусс, Е. В. Полтавцева, Ю. В. Морозова, И. А. Сагарьяров</i>	39
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КРИПОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В ЗОНЕ СУБДУКЦИИ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ МЕХАНИКИ СИСТЕМ С НЕСМЕЖНЫМИ ФОРМАМИ РАВНОВЕСИЯ <i>И. А. Гарагаш</i>	41
ВОЗДЕЙСТВИЕ АНОМАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ БАХА 2010 г. С $M = 7.2$ (ПО ДАННЫМ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЮЖНОЙ КАЛИФОРНИИ) <i>М. Б. Гохберг, И. А. Гарагаш, Д. А. Алексеев, Н. А. Белов</i>	42
ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ЛИТОСФЕРЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ВОСТОЧНО ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ ПО ДАННЫМ ОБМЕННЫХ ВОЛН <i>А. Г. Гоев</i>	44
АЛЬФВЕНОВСКИЕ РЕЗОНАНСЫ НА БАЗЕ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ «МИХНЕВО» <i>Е. С. Горбовская</i>	46
ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ ВАРИАЦИЙ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ВОДОНАСЫЩЕННОГО КОЛЛЕКТОРА ПРИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВАХ (ПО ДАННЫМ МОНИТОРИНГА НА ПОЛИГОНЕ «ГУБКИН» КМА) <i>Э. М. Горбунова, С. М. Петухова, Н. В. Кабыченко, А. В. Караваев</i>	48
АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ВУЛКАНИЧЕСКИХ РОЕВ В ПРЕДЭРУПТИВНЫЕ ФАЗЫ <i>Е. М. Греков</i>	50
ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТРИГГЕРНЫХ СОБЫТИЙ И АФТЕРШОКОВЫХ СЕРИЙ ПРИ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ УДАРООПАСНОСТИ ГОРНОГО МАССИВА ПО ДАННЫМ СИСТЕМЫ «PROGNOZ-ADS» <i>А. П. Грунин, А. В. Сидляр</i>	52
КЛАССИФИКАЦИЯ ТРИГГЕРОВ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГЕОСФЕРАХ <i>А. В. Гульельми, А. Д. Завьялов, О. Д. Зотов</i>	54
ТРИ ВИДА ТРИГГЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ ИЗ РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ <i>А. В. Гульельми, А. С. Потапов, Ф. З. Фейгин, Б. В. Довбня, О. Д. Зотов</i>	56
ЭФФЕКТИВНЫЙ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНЫЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР: КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ <i>С. А. Гуляков, Л. М. Богомолов, Н. С. Стовбун, И. П. Дудченко</i>	58
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ В ОБЛАСТИ, ОБЛАДАЮЩЕЙ СВОЙСТВАМИ ЗОНЫ СУБДУКЦИИ <i>Е. Е. Дамаскинская, В. Л. Гиляров</i>	59
ИЗУЧЕНИЕ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССА САМОВОЗГОРАНИЯ УГЛЯ НА ОСНОВЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ КАМЕННЫХ УГЛЕЙ <i>А. И. Докучаева, О. Н. Малинникова</i>	61
СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕТЕПЛОВОГО ГЕКТОМЕТРОВОГО КОНТИНУУМ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ СЕМИ ЛЕТ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ <i>Д. А. Дорофеев, А. А. Чернышов, Д. В. Чугунин, М. М. Могилевский</i>	63
МОДЕЛЬ ФРАГМЕНТАЦИИ МЕЛКИХ МЕТЕОРНЫХ ТЕЛ <i>В. В. Ефремов</i>	65
ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ ФАКТОРОВ НА ДРОБЯЩЕЕ И СЕЙСМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВА <i>Н. Н. Ефремовцев, В. М. Закалинский, И. Е. Шиповский, Р. Я. Мингазов</i>	66
О РАСЧЕТЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В УДАРООПАСНОМ МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД В РАМКАХ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГРАДИЕНТНОГО ТИПА <i>Д. С. Журкина, С. В. Лавриков, А. Ф. Ревуженко</i>	68

К ВОПРОСУ О КЛАССИФИКАЦИИ ГЛАВНЫХ УДАРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ <i>А. Д. Завьялов, О. Д. Зотов, А. В. Гульельми</i>	70
ОЦЕНКА ПРЕДВЕСТНИКОВ КАМЧАТСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 29 ИЮЛЯ 2025 г. ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОБРАБОТКИ ГНСС ИЗМЕРЕНИЙ <i>Р. В. Загреддинов, А. А. Загреддинов, В. Ф. Бахтияров</i>	72
ИЗМЕНЕНИЕ ЧАСТОТ ШУМАНОВСКИХ РЕЗОНАНСОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК <i>К. А. Зенин</i>	74
ТЕХНОГЕННЫЕ ТРИГГЕРЫ ГЛОБАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ <i>О. Д. Зотов, А. Д. Завьялов, А. В. Гульельми</i>	76
КОНЦЕПЦИЯ РАНЖИРОВАНИЯ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННОЙ ГЕОСИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ <i>Г. Н. Иванченко, Э. М. Горбунова</i>	78
ВЛИЯНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ВДОЛЬ ТРАСС СЕЙСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН <i>Г. Н. Иванченко, И. А. Санина</i>	80
ДИНАМИКА СМЕЩЕНИЙ И СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ В МОДЕЛИ СЕЙСМОГЕННОГО РАЗЛОМА <i>П. А. Казначеев, А. В. Пономарев, З.-Ю. Я. Майбук, Д. В. Краюшкин, А. Б. Сырицкий</i>	82
АНАЛИЗ МЕТЕОРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ <i>А. П. Карташова, О. П. Попова, А. К. Муртазов, В. С. Жабин, В. В. Ефремов</i>	84
ЭВОЛЮЦИЯ СДВИГОВОЙ ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ КАК ВЕРОЯТНЫЙ ТРИГГЕР КАМЧАТСКОГО МЕГАЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ <i>В. И. Кафтан, П. А. Докукин</i>	86
ПРИМЕНЕНИЕ СПЕЦИФИЧЕСКИХ «ЗЕЛЕННЫХ» ТЕХНИК ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ГВИНЕЕ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ <i>Д. Кеита, М. С. Бурханов</i>	88
ВЛИЯНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ НА СООТНОШЕНИЕ МАГНИТУД M_s и M_w КРУПНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ <i>М. Н. Кирякова, А. Л. Стром</i>	90
РАЗМЕРЫ ЗОН АСПЕРИТИ И ИХ СВЯЗЬ С ПРОЦЕССОМ ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ <i>С. Б. Кишкина, Г. Г. Кочарян</i>	92
ПРОЯВЛЕНИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ В F-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ <i>М. В. Клименко, К. В. Белюченко, 2, Ф. С. Бессараб, В. В. Клименко, К. Г. Ратовский</i>	94
ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА МОРСКИХ РЕГИОНОВ В РАЗНЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ОБСТАНОВКАХ <i>И. А. Клоков, А. А. Крылов, М. А. Новиков, Е. С. Горбатов</i>	96
КО-СЕЙСМИЧЕСКАЯ ФАЗА ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГЕОСРЕДЫ ПО ДАННЫМ ПРЕЦИЗИОННЫХ СКВАЖИННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ <i>Г. Н. Копылова, С. В. Болдина</i>	98
ВЕРИФИКАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИОНИЗАЦИИ И РЕКОМБИНАЦИИ D-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ СДВ-НАБЛЮДЕНИЙ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК <i>В. О. Копышова</i>	100
О ВОЗМОЖНОМ ТРИГГЕРЕ СИЛЬНЫХ $M \geq 6.8$ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ОДНОВРЕМЕННОМ АНОМАЛЬНОМ РАЗВИТИИ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ В 2025 г. <i>В. М. Костин, О. Я. Овчаренко, Е. П. Трушкина</i>	101
МОДЕЛЬ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-РАЗЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕН ПРИХОДА СЕЙСМИЧЕСКИХ ФАЗ НА ЗАПИСЯХ ГРУППЫ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СКВАЖИННЫХ ПРИЕМНИКОВ <i>Р. Д. Костолина</i>	103

ОСОБЕННОСТИ НАГРЕВА ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЫ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ НАЗЕМНЫХ УСТАНОВОК В ДИАПАЗОНАХ СРЕДНИХ И ДЛИННЫХ ВОЛН <i>Д. С. Котик, О. Ю. Журавлева, В. А. Яшинов</i>	105
ФОРШОКИ КАК ТРИГГЕРЫ КРУПНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ. ВЕРОЯТНЫЙ МЕХАНИЗМ ИНИЦИИРОВАНИЯ ГЛАВНОГО ТОЛЧКА <i>Г. Г. Кочарян, С. Б. Кишкина</i>	107
СЕЙСМОТРИГГЕРНЫЙ ФАКТОР В ОПОЛЗНЕВЫХ И ФЛЮИДОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ В АКВАТОРИИ МОРЕЙ <i>А. А. Крылов</i>	109
ЕСТЕСТВЕННАЯ ДЕЛИМОСТЬ ГОРНО-ПОРОДНЫХ МАСС: СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКИЙ АСПЕКТ (В РАЗВИТИЕ ИДЕЙ АКАДЕМИКА М. А. САДОВСКОГО) <i>М. Г. Леонов</i>	111
ИЗМЕНЕНИЕ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ СМЕЩЕНИЙ ПО ПЕРЕСЕКАЮЩИМСЯ РАЗЛОМАМ <i>А. С. Лермонтова</i>	113
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК НА СКОРОСТЬ ИОНИЗАЦИИ В ВЕРХНИХ СЛОЯХ ИОНОСФЕРЫ <i>В. С. Лобанова, И. А. Ряховский, Ю. А. Корсунская, Ю. В. Поклад, А. И. Сапунова</i>	115
СУБДУКЦИОННО-КОНВЕКТИВНАЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ХРЕБТА ГАККЕЛЯ И ЛАПТЕВОМОРСКОЙ РИФТОВОЙ СИСТЕМЫ <i>Л. И. Лобковский, А. А. Баранов, А. А. Крылов, И. А. Гарагаи</i>	117
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И НАПРЯЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНОЙ ГЛОБАЛЬНОЙ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЗЕМЛИ <i>Л. И. Лобковский, А. А. Баранов, А. М. Бобров, Ю. В. Габсатаров, А. В. Чуваев</i>	119
АНИЗОТРОПИЯ ПОРОУПРУГОГО ОТКЛИКА ТРЕЩИНОВАТЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН <i>Д. В. Ложкин, И. А. Пантелеев, Vladimir Lyakhovsky</i>	121
ТРИГГЕРНЫЙ ЭФФЕКТ РОЕВОЙ АКТИВНОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ <i>В. С. Лютикова, И. Н. Литовченко</i>	122
ВОЛНЫ ЦУНАМИ ПРИ ВОЗМОЖНОМ ОБРУШЕНИИ ЧАСТИ ЛЕДНИКА ТУЭЙТСА <i>Р. Х. Мазова, А. Д. Артемьев, А. А. Баранов</i>	125
ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИНФРАЗВУКОВЫХ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ПОМЕХ <i>П. Н. Мартысевич</i>	126
О ПУТЯХ НАГРУЖЕНИЯ СЫПУЧЕЙ СРЕДЫ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ НЕОГРАНИЧЕННЫЕ СДВИГИ БЕЗ ПЕРЕХОДА В ЗАПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ <i>О. А. Микенина, В. П. Косых, А. Ф. Ревуженко</i>	127
ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПОДРАБОТАННОГО МАССИВА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ И РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ <i>В. О. Михайлов, А. А. Барях, Н. А. Самоделкина, И. П. Бабаянц, Е. П. Тимошкина</i>	129
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОСКАЛЫВАНИЯ ПО ГЕТЕРОГЕННУМУ РАЗЛОМУ <i>К. Г. Морозова, А. А. Остапчук, Д. В. Павлов</i>	131
ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО КВАРЦЕВОГО ГРАВИМЕТРА ГНУ-КВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОКРЫВАЮЩЕЙ ТОЛЩЕ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ НЕФТЕГАЗОВЫХ ХРАНИЛИЩ В СОЛЯНЫХ ФОРМАЦИЯХ <i>А. Р. Мухаметзянов</i>	133

ЗАВИСИМОСТЬ ПРОНИЦАЕМОСТИ ОТ НАПРЯЖЕНИЙ В РЕГУЛЯРНО-БЛОЧНЫХ ГЕОСРЕДАХ С КОНТРАСТНЫМИ ФИЛЬТРАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ ПО ДАННЫМ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ <i>Л. А. Назаров, Л. А. Назарова</i>	135
КОНТРОЛЬ ВЫБРОСООПАСНОСТИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОГО ПРОСВЕЧИВАНИЯ: ТЕОРИЯ И ЛАБОРАТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ <i>Л. А. Назарова, Л. А. Назаров</i>	137
СТРУКТУРНО-СКЕЙЛИНГОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В АНСАМБЛЯХ ДЕФЕКТОВ И НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ <i>О. Б. Наймарк, Н. В. Савельева, И. А. Банникова, С. В. Уваров</i>	139
ТРИГГЕРНЫЕ ФАКТОРЫ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИРОДЫ <i>В. Л. Натяганов</i>	141
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ: ПОЛЕВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ, ЛАБОРАТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ВОЗМОЖНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ <i>В. А. Новиков</i>	143
ОТКЛИК СЕЙСМИЧНОСТИ ЗОН ПОДГОТОВКИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ <i>В. А. Новиков, М. В. Новикова</i>	145
ПАРАМЕТРЫ СЕРИИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В АКВАТОРИИ ЧЕРНОГО МОРЯ ВБЛИЗИ г. СОЧИ В МАРТЕ 2026 г. ПО ДАННЫМ ЛОКАЛЬНОЙ СЕТИ <i>М. А. Новиков, А. А. Крылов</i>	147
МОНИТОРИНГ ТЕХНОГЕННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ РЕСПУБЛИКИ КОМИ <i>Н. Н. Носкова, И. П. Габсатарова, З. В. Темникова</i>	149
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ЗЕРНА ЦИРКОНА В СДВИГОВОЙ ПОЛОСЕ: ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ <i>А. А. Остапчук, Б. А. Иванов</i>	151
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ЗОНЫ СУБДУКЦИИ <i>А. А. Остапчук, И. И. Нугманов, К. Г. Морозова, О. В. Бергаль-Кувикас</i>	153
ИНИЦИИРОВАНИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ЗОНАХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ РАЗЛОМОВ <i>А. А. Остапчук, Д. В. Павлов, А. М. Будков</i>	155
КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ (НА ПРИМЕРЕ КЫРГЫЗСТАНА) <i>С. Ж. Орунбаев, М. В. Родкин</i>	156
ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОПОЛЗНЕВОЙ АКТИВНОСТИ НА ЮГЕ КЫРГЫЗСТАНА <i>С. Ж. Орунбаев, Б. Мурзали</i>	158
РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАЗРЫВА В ЛАБОРАТОРНОЙ МОДЕЛИ СЕЙСМОГЕННОГО РАЗЛОМА МЕТРОВОГО МАСШТАБА С НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРОЙ <i>Д. В. Павлов, И. С. Харламов</i>	160
АПРОБАЦИЯ МЕТОДОВ ТЕОРИИ ЭФФЕКТИВНЫХ СРЕД ДЛЯ ОЦЕНКИ УПРУГИХ СВОЙСТВ СИЛЬВИНИТА ПО ДАННЫМ РЕНТГЕНОВСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ <i>И. А. Пантелеев, А. А. Барях, Д. В. Ложкин</i>	161
ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРИГГЕРНОЙ АКТИВИЗАЦИИ РАЗЛОМНЫХ ЗОН: УПРАВЛЕНИЕ ЦИКЛИЧЕСКИМИ НАГРУЗКАМИ И РЕГИСТРАЦИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ <i>А. В. Патонин, Н. М. Шихова</i>	163

ПРОХОДКА И КРЕПЛЕНИЕ ВЫРАБОТОК В МАССИВАХ, ПОДВЕРЖЕННЫХ ДЕЙСТВИЮ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ <i>П. Г. Пацкевич, А. В. Жабко, Е. В. Красюкова, С. А. Горинов</i>	165
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕГИСТРАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВОВ НА ПОВЕРХНОСТИ И В ВЫРАБОТКЕ <i>С. М. Петухова, А. Ю. Федоров</i>	167
ВОЗДЕЙСТВИЕ УНЧ–КНЧ ИЗЛУЧЕНИЙ ОТ ЛЭП НА ОКОЛОЗЕМНУЮ СРЕДУ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА <i>В. А. Пилипенко, Н. В. Савельева, А. С. Карпов, В. В. Колобов, Джинг Ву</i>	169
АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО РАЗМЕРУ СВЕЖИХ УДАРНЫХ КРАТЕРОВ НА МАРСЕ <i>Е. Д. Подобная, О. П. Попова</i>	171
УНИКАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ УСТАНОВКА «СРЕДНЕШИРОТНЫЙ КОМПЛЕКС ГЕОФИЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ «МИХНЕВО»»: ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ. <i>Поклад Ю.В., Беседина А.Н., Гаврилов Б.Г., Гоев А.Г., Горбунова Е.М., Рыбнов Ю.С., Соловьев С.П., Ряховский И.А.</i>	173
КЛАССИФИКАЦИЯ СПУТНИКОВЫХ БОЛИДОВ <i>О. П. Попова, Д. О. Глазачев</i>	175
ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЦИНТИЛЛЯЦИЙ РАДИОВОЛН В СЛУЧАЙНО НЕОДНОРОДНОЙ ИОНОСФЕРЕ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ НА СПУТНИКЕ DYNAMIC EXPLORER 2 <i>М. В. Прудникова, Е. С. Гончаров</i>	177
СЕЙСМИЧЕСКИЙ ОТКЛИК НА «КАННИБАЛЬСКУЮ» ГЕОМАГНИТНУЮ БУРЮ В ЯНВАРЕ 2026 г. И ВЫЗВАННЫЕ ИМ ГЛУБОКОФОКУСНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ <i>С. А. Пулинец, Д. Узунов, Г. Я. Хачикян</i>	179
ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ ПОРИСТЫХ ГРУНТОВ НА ПРОХОЖДЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН РАЗНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ <i>Е. А. Радюк, А. А. Крылов</i>	181
ВОЗМОЖНОСТЬ ПРАКТИЧЕСКОГО ВЫЯВЛЕНИЯ ПРИБЛИЖЕНИЯ СОСТОЯНИЯ КУСКОВАТО БЛОЧНОЙ СРЕДЫ К ТОЧКЕ БИФУРКАЦИИ ИЗ ДАННЫХ ОБ ЭВОЛЮЦИИ СЕЙСМОГЕННОЙ СТРУКТУРЫ И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ <i>Ю. Л. Ребецкий</i>	183
ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАЙОНИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ УЧАСТКОВ РАЗЛОМОВ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ ПО КУЛОНОВЫМ НАПРЯЖЕНИЯМ <i>Ю. Л. Ребецкий, А. М. Муралиев</i>	186
ГЛУБИННЫЕ ФЛОИДНЫЕ ПОТОКИ ПО СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИМ И ГЕОХИМИЧЕСКИМ ДАННЫМ <i>М. В. Родкин</i>	188
ПРОГНОЗ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ: ТИПОВЫЕ ПРОГНОЗНЫЕ ПРИЗНАКИ, РАСШИРЕНИЕ НАБОРА ПРИЗНАКОВ <i>М. В. Родкин, А. А. Любушин, Е. В. Литеровская</i>	190
РЕГИСТРАЦИЯ ГРАДИЕНТОВ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ МЕТОДОМ ТРАНСИОНОСФЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С КА «ИОНОСФЕРА-М» <i>И. В. Романов, Д. В. Григорьев</i>	192
ГЕОМАГНИТНЫЕ ВАРИАЦИИ, ПРЕДШЕСТВУЮЩИЕ УРАГАНУ ЭДГАР (ОБСЕРВАТОРИЯ МОСКВА) <i>С. А. Рябова</i>	194
ПРОГНОЗ НА ОСНОВЕ LSTM МОДЕЛИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА НА ГОРЕ ЦУГШПИТЦЕ <i>С. А. Рябова</i>	195

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРНО-ИОНОСФЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ <i>И. А. Ряховский, Ю. В. Поклад, Б. Г. Гаврилов, С. З. Беккер, В. М. Ермак, А. И. Сапунова, В. С. Лобанова, Г. А. Лесников</i>	196
ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОГЛОЩЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН НА ВОСТОЧНО ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЕ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ В ОБСЕРВАТОРИИ «МИХНЕВО»: ПОПЫТКА ИНТЕРПРЕТАЦИИ <i>И. А. Санина, М. В. Родкин</i>	198
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЛИВНОГО ВЛИЯНИЯ ЛУНЫ НА ИОНОСФЕРУ ПО ДАННЫМ ГФО «МИХНЕВО» <i>А. И. Сапунова, И. А. Ряховский, Ю. В. Поклад, В. С. Лобанова</i>	200
ВОЗМОЖНОСТИ ДОЗИМЕТРОВ RDS-31S ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ МОНИТОРИНГА ПРИРОДНОГО РАДИАЦИОННОГО ФОНА У ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ <i>Д. Г. Сахибгареев, Н. П. Романов, О. И. Озолс</i>	202
ХАРАКТЕРИСТИКИ ОЧАГОВ СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ КАМЧАТСКОГО МЕГАЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ <i>А. А. Скоркина, А. А. Остапчук, Д. В. Чебров, П. Н. Шебалин</i>	204
ИНДУЦИРОВАННЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ЗАПАДНОГО АЛТАЯ <i>И. Н. Соколова, А. Е. Великанов, И. Л. Аристова</i>	206
ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ СТРУКТУРЫ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ S-ВОЛН В РАЙОНЕ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ: ВОЗМОЖНАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ С ВАРИАЦИЯМИ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И СИЛЬНЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ <i>И. Н. Соколова, Ю. Ф. Копничев, Г. Я. Хачикян</i>	208
АКТИВИЗАЦИИ И РАЗВИТИЕ РАЗЛОМА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ <i>Ю. П. Стефанов, Р. А. Бакеев, А. А. Дучков</i>	210
ВАРИАЦИИ ВЕРТИКАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ ЭЛЕКТРОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И СЕЙСМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ЮЖНОЙ ЧАСТИ САХАЛИНА В 2024-2026 гг. <i>Н. С. Стовбун, Л. М. Богомолов, А. С. Закутин, И. П. Дудченко, С. А. Гуляков, Д. В. Костылев</i>	211
ВРЕМЕННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ БЕНЬОФФА В ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОКРЕСТНОСТИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЕВРАЗИИ <i>В. Н. Сычев, Л. М. Богомолов, М. В. Родкин</i>	213
ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СБРОСА НАПРЯЖЕНИЙ <i>Н. А. Сычева</i>	215
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА В ПЕСЧАНОМ СЛОЕ <i>А. А. Таирова, Н. А. Юдочкин, Г. В. Беляков</i>	217
ТРИ КЛАССА ЗАПРЕДЕЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ ЦЕЛЬНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ РАЗЛИЧНЫЕ ФОРМЫ СПОНТАННОГО РАЗРУШЕНИЯ НА РАЗНЫХ ГЛУБИНАХ ЗЕМНОЙ КОРЫ <i>Б. Г. Тарасов</i>	219
АНОМАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГРАФИКОВ ПОВТОРЯЕМОСТИ В ПЕРИОД ПРОВЕДЕНИЯ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ <i>Н. Т. Тарасов, Н. В. Тарасова</i>	220
ВОПРОСЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ РАННЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА <i>Ц. А. Тубанов, М. А. Хритова</i>	222
ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВЫХ СПЕКТРОВ АФТЕРШОКОВ КУДАРИНСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ (09.12.2020, MW = 5.5) НА СРЕДНЕМ БАЙКАЛЕ <i>Ц. А. Тубанов, А. А. Скоркина, Д. П.-Д. Санжиева</i>	224

ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ МАКСИМАЛЬНОЙ МАГНИТУДЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, ИНДУЦИРОВАННЫХ ЗАКАЧКОЙ ЖИДКОСТИ <i>С. Б. Турунтаев, В. Ю. Рига, Н. А. Барышников</i>	226
РЕАНАЛИЗ ДАННЫХ АКТИВНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ – ШАГ НАЗАД ИЛИ ДВА ШАГА ВПЕРЕД? <i>Е. М. Урвачев</i>	228
ОБНАРУЖЕНИЕ ВОЛН I2 И I4 В КОДЕ СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ <i>О. А. Усольцева, В. М. Овчинников</i>	230
ФАКТОРЫ, ПРИВОДЯЩИЕ К ВОЗНИКНОВЕНИЮ ГОРНО-ТЕКТОНИЧЕСКИХ УДАРОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ <i>Ю. В. Федотова, И. Ю. Рассказов, М. И. Потапчук</i>	232
ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ОЦЕНКИ КОНЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ПО ДАННЫМ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН: ПРИМЕР ИЛИН-ТАССКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 14 ФЕВРАЛЯ 2013 г. (MW =6.7, ЯКУТИЯ) <i>А. И. Филиппова, А. С. Фомочкина</i>	234
РОССИЙСКИЙ ПРОЕКТ «ИОНОЗОНД» <i>А. А. Чернышов и команда проекта «Ионозонд»</i>	236
СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ ФРАГМЕНТАЦИИ ГЕОСРЕДЫ ПРИМОРСКОГО РАЗЛОМА <i>В. Е. Чинкин, А. А. Остапчук</i>	237
ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА С КРУПНЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ ПО ДАННЫМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ <i>Т. К. Чумаков, Е. В. Зенченко, П. Е. Зенченко, С. Б. Турунтаев</i>	239
ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДВОДНЫХ СКЛОНОВ <i>З. З. Шарафиев</i>	241
ИЗМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ РАЗЛОМНОЙ ЗОНЫ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ <i>И. В. Шатунов, Г. Г. Кочарян</i>	243
НОВЫЙ МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ НЕРАВНОВЕСНЫХ СОСТОЯНИЙ ПРИ ВНЕЗАПНЫХ ВЫБРОСАХ В КВАЗИУСТОЙЧИВЫХ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТАХ НА ОСНОВЕ КИНЕТИКИ LEE–TARVER <i>И. Е. Шитовский, В. А. Трофимов</i>	245
СХОДИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ ПЕСЧАНИКОВ <i>Н. М. Шихова, А. В. Патонин</i>	248
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ ТРЕЩИН ГИДРОРАЗРЫВА В УСЛОВИЯХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ ПРОДУКТИВНОГО ПЛАСТА <i>Н. А. Юдочкин, А. А. Таирова, Г. В. Беляков</i>	250
ФАЗОВЫЕ И АМПЛИТУДНЫЕ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ДЛИННОПЕРИОДНЫМИ ГЕОМАГНИТНЫМИ ПУЛЬСАЦИЯМИ И ВАРИАЦИЯМИ ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ <i>Н. В. Ягова, Я. А. Сахаров, Е. Н. Федоров, В. Н. Селиванов</i>	252

ВОРКШОП "МЕТОДЫ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ СВЕТОВЫМИ ПУЧКАМИ"

ИЗМЕРЕНИЕ И КОМПЕНСАЦИЯ СРЕДНЕГО НАКЛОНА ВОЛНОВОГО ФРОНТА <i>Г. В. Баикатов, И. В. Животовский, В. Е. Карасик, А. А. Сахаров</i>	255
ПЕРЕНОС ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРУ В КОСМОС ПРИ НАЛИЧИИ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОБЛАКОВ <i>В. П. Бусыгин, И. Ю. Кузьмина</i>	257
ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭОП В АДАПТИВНЫХ СИСТЕМАХ <i>В. Е. Карасик, Г. В. Баикатов, И. В. Животовский, А. А. Сахаров</i>	259
ГИБКИЕ МАТРИЧНЫЕ МЭМС-ЗЕРКАЛА ДЛЯ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ <i>Д. В. Козлов, И. П. Смирнов</i>	261
ТЕОРИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ ДЛЯ ФАЗОВЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕЙСЯ В ТУРБУЛЕНТНОЙ СРЕДЕ <i>И. В. Колоколов, В. В. Лебедев, Ф. А. Стариков, В. А. Богачев, А. В. Немцева</i>	263
ГИБРИДНЫЙ МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИСКАЖЕНИЙ ВОЛНОВОГО ФРОНТА НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ <i>А. В. Котов, Ю. А. Родимков, С. Е. Перевалов, К. Ф. Бурдонов, И. Б. Мееров, А. А. Соловьев</i>	265
АДАПТИВНАЯ ОПТИКА В СОВРЕМЕННЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ <i>А. В. Кудряшов</i>	266
ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА УПРАВЛЯЮЩИХ ЭЛЕКТРОДОВ БИМОРФНОГО ДЕФОРМИРУЕМОГО ЗЕРКАЛА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОРРЕКЦИИ АТМОСФЕРНЫХ ИСКАЖЕНИЙ <i>П. М. Кузьмицкий, Ю. В. Шелдакова</i>	268
СТАТИСТИКА ВЫСОКИХ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ СВЕТА, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ В ТУРБУЛЕНТНОЙ СРЕДЕ <i>В. В. Лебедев</i>	270
УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ МЕТОДАМИ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ <i>П. Ц. Люй, А. Н. Никитин</i>	271
АТМОСФЕРА ГОРОДА И КВАНТОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КЛЮЧЕЙ <i>С. Ю. Поляков, К. И. Приходько, С. Е. Широбакин</i>	273
ОСОБЕННОСТИ КОРРЕКЦИИ НАКЛОНОВ В ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ В КОНТУРЕ УПРАВЛЕНИЯ ДАТЧИКА ВОЛНОВОГО ФРОНТА ШАКА-ГАРТМАНА <i>А. Л. Рукоусев</i>	275
ШИРОКОАПЕРТУРНАЯ АДАПТИВНАЯ ОПТИКА ДЛЯ ПЕТАВАТТНЫХ ЛАЗЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ <i>В. В. Самаркин</i>	276

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕРАТИВНОЙ МОДЕЛИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ СИНТЕЗА МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ ФОРМ ПРИ ОГРАНИЧЕННОМ ОБЪЕМЕ ДАННЫХ

И. А. Абзалилов*

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

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

Методы микросейсмического мониторинга позволяют отследить множество процессов, происходящих в районах с естественной и индуцированной сейсмичностью. Современные подходы на основе методов машинного обучения в значительной степени позволяют улучшить результаты обработки данных мониторинга. Большую роль при обучении играет качество данных и их объем. Поэтому отдельное место в процессе обучения моделей нейронных сетей занимают подготовка обучающей выборки и дальнейшая валидация результатов. Несмотря на то, что существующие в открытом доступе наборы данных содержат большое количество размеченных волновых форм для обучения глубоких моделей, это не решает проблему недостаточного объема обучающей выборки для обучения нейронных сетей на данных локальных сетей или сетей с небольшим числом станций. Одним из подходов, позволяющих минимизировать дефицит размеченных данных, являются методы генерации на основе нейронных сетей.

В настоящее время предложено несколько основных подходов к генерации синтетических волновых форм. К ним можно отнести модели на основе сверточных слоев, различные варианты автоэнкодеров, генеративные модели. В данной работе применен подход с обучением условной генеративно-сопоставительной модели (cGAN). Выбор обусловлен возможностью обучения подобных моделей на малом объеме обучающей выборки. Достаточным объемом данных являются выборки объемом от нескольких сотен волновых форм.

Для обучения использовались данные экспериментов HFTS-2. Модель обучалась для каждой станции отдельно, что позволяет синтезировать соответствующие волновые формы с заданными длиной записи и разницей между временами вступления Р и S волн. Предварительные результаты позволяют говорить о применимости данного подхода для данных микросейсмического мониторинга. В дальнейшем предполагается их применение для улучшения качества моделей нейронных сетей, предназначенных для решения задач анализа микросейсмических сигналов и их источников.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012100531-7).

APPLICATION OF A GENERATIVE NEURAL NETWORK MODEL TO SYNTHESIZE MICROSEISMIC WAVEFORMS WITH LIMITED DATA

I. A. Abzalilov*

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

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

Microseismic monitoring methods enable the tracking of numerous processes occurring in areas with natural and induced seismicity. Modern approaches based on machine learning methods significantly improve the results of monitoring data processing. Data quality and volume play a major role in training. Therefore, the preparation of a training set and subsequent validation of results play a special role in the training of neural network models. Although existing publicly available datasets contain a large number of labeled waveforms for training deep models, this does not solve the problem of insufficient training sets for training neural networks on data from local networks or networks with a small number of stations. One approach to minimizing the shortage of labeled data is neural network-based generation methods.

Several main approaches to generating synthetic waveforms have been proposed. These include models based on convolutional layers, various types of autoencoders, and generative models. In this paper, we used an approach using training a conditional generative adversarial model (cGAN). The choice was driven by the ability to train such models on a small training set. A sufficient data volume is typically a few hundred waveforms

Data from the HFTS-2 experiments was used for training. The model was trained separately for each station, allowing for the synthesis of corresponding waveforms with a given record length and difference between P- and S-wave arrival times. Preliminary results suggest the applicability of this approach to microseismic monitoring data. Further application is expected to improve the quality of neural network models designed to analyze microseismic signals and their sources.

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЛИТОСФЕРЫ КАВКАЗА НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Д. Ж. Акматов*, В. Н. Татаринов

Геофизический центр Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: d.akmatov@gcras.ru*

В работе рассмотрены результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния литосферы Большого Кавказа как сегмента Альпийско-Гималайского коллизийного пояса. Моделирование выполнено в среде COMSOL Multiphysics методом конечных элементов в квазистатической трехмерной постановке. Земная кора описана как упругопластическая среда, а верхняя мантия – как вязкоупругая среда типа Максвелла. Геометрия модели включает коровую часть мощности до 60 км и подстилающий мантийный слой до глубины 150 км. Граничные условия задавались с учетом регионального режима сжатия $SH_{\max} > Sh_{\min} > Sv$. Ключевое значение имеет преобразование боковых смещений в вертикальные (поперечное сплющивание или сдвиг по Л. М. Расцветаеву). Для верификации и интерпретации результатов привлекались опубликованные в сейсмических каталогах данные о современных движениях земной коры и распределении высвобожденной сейсмической энергии.

Результаты моделирования показали, что поле напряжений земной коры в пределах Большого Кавказа определяется откликом перемещений жестких структурных блоков, разделенных ослабленными разломными зонами и анизотропией реологических свойств по глубине. Максимальные вертикальные перемещения и повышенные значения интенсивности напряжений локализованы в осевой части орогена и вблизи крупных тектонических структур. Анализ параметров тенденции к сдвигу и коэффициента Лоде–Надаи показал, что крупнейшие разломы находятся преимущественно в режиме сжатия и надвигообразования, тогда как отдельные сегменты разломной сети обладают выраженной предрасположенностью к сдвиговой реактивации. Это подтверждает сложный, пространственно неоднородный характер современного напряженно-деформированного состояния литосферы региона.

Наиболее важным результатом является выявление метастабильных зон концентрации механической энергии в пределах сейсмогенерирующего слоя. Эти зоны характеризуются повышенными девиаторными напряжениями, накоплением упругой энергии и качественно совпадают с областями максимальной плотности высвобождения сейсмической энергии, рассчитанной по каталогам землетрясений. Тем самым показано, что Большой Кавказ представляет собой метастабильную геомеханическую систему, в которой накопленная энергия может трансформироваться как в вертикальное поднятие орогена, так и в энергию разрушения в виде землетрясений. Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшей оценки сейсмической опасности региона, а также для последующей интеграции численного моделирования с данными ГНСС наблюдений и другими геодезическими измерениями.

ANALYSIS OF THE STRESS–STRAIN STATE OF THE CAUCASUS LITHOSPHERE BASED ON THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL MODELING

D. Z. Akmatov*, V. N. Tatarinov

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

**E-mail: d.akmatov@gcras.ru*

The paper presents the results of numerical modeling of the stress–strain state of the Greater Caucasus lithosphere as a segment of the Alpine–Himalayan collisional belt. The modeling was carried out in COMSOL Multiphysics using the finite element method in a quasi-static three-dimensional formulation. The Earth's crust was represented as an elastoplastic medium, whereas the upper mantle was described as a Maxwell-type viscoelastic medium. The model geometry includes a crustal layer up to 60 km thick and an underlying mantle layer extending to a depth of 150 km. Boundary conditions were specified with regard to the regional compressional regime, $SH_{\max} > Sh_{\min} > Sv$. Of key importance is the transformation of lateral displacements into vertical ones (transverse shortening, or «sodvig» in the sense of L. M. Rastsvetaev). For verification and interpretation of the results, published data on present-day crustal movements, seismic catalogs, and the distribution of released seismic energy were used.

The modeling results showed that the stress field of the crust within the Greater Caucasus is controlled by the displacement response of rigid structural blocks separated by weakened fault zones and by the anisotropy of rheological properties with depth. Maximum vertical displacements and elevated stress intensity values are localized in the axial part of the orogen and near major tectonic structures. Analysis of slip tendency and the Lode–Nadai coefficient demonstrated that the largest faults predominantly operate under compression and thrust-related deformation, whereas certain segments of the fault network exhibit a pronounced tendency toward strike-slip reactivation. This confirms the complex and spatially heterogeneous character of the present-day stress–strain state of the region's lithosphere.

The most important result is the identification of metastable zones of mechanical energy concentration within the seismogenic layer. These zones are characterized by elevated deviatoric stresses and elastic energy accumulation, and they qualitatively coincide with areas of maximum seismic energy release density calculated from earthquake catalogs. Thus, the Greater Caucasus is shown to represent a metastable geomechanical system in which the accumulated energy may be transformed both into vertical uplift of the orogen and into fracture energy released in the form of earthquakes. The obtained results may be used for further assessment of the seismic hazard of the region, as well as for the subsequent integration of numerical modeling with GNSS observations and other geodetic measurements.

КОСЕЙСМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ТЕЛЕСЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ

И. М. Алешин^{1,3} *, А. А. Соловьев^{1,3}, А. Г. Гоев², Д. В. Кудин¹

¹Геофизический центр Российской академии наук, Москва, Россия

²Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

³Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: ima@ifz.ru

В докладе обсуждаются особенности электромагнитных сигналов, регистрируемых геомагнитными обсерваториями во время прохождения сейсмических волн от удалённых землетрясений. Явление возникновения возмущений, сопутствующих распространению в Земле механических волн, получило название косейсмического электромагнитного (КоСЭМ) эффекта. Сейсмические волны, производимые удалёнными землетрясениями, также могут служить источником КоСЭМ сигнала. Такого рода сигналы по форме схожи с сейсмическими записями. Спектральный состав КоСЭМ отклика соответствует спектру сейсмического сигнала; частоты возмущений лежат в диапазоне 0.01–0.5 Гц.

Проявления соответствующих КоСЭМ возмущений достаточно часто встречаются в записях станций магнитотеллурического зондирования на относительно небольших эпицентральных расстояниях порядка 5–8 градусов. В зависимости от условий регистрации наблюдается электромагнитный отклик на все основные телесейсмические фазы: продольные и поперечные объёмные волны, поверхностные волны Рэлея и Лява. Начиная с 1 января 2014 г., в международной сети INTERMAGNET введён в практику наблюдений стандарт 1-секундной регистрации данных: обсерватории, входящие в состав сети, наряду с минутными, должны предоставлять данные с минимальным разрешением в 1 секунду (формат IAGA-2002). Помимо прочего, переход на новый формат предоставил уникальную возможность регистрации электромагнитных возмущений, вызванных сейсмическими волнами удалённых землетрясений на больших эпицентральных расстояниях.

В докладе рассмотрен ряд аспектов, связанных с КоСЭМ эффектом от телесейсмических событий. Во-первых, обсуждаются условия, при которых наблюдение эффекта в принципе возможно. Широкая сеть постоянно действующих магнитных обсерваторий сети INTERMAGNET с односекундной регистрацией даёт возможность исследовать зависимость КоСЭМ, проявлений от магнитуды землетрясения и эпицентрального расстояния обсерватории. Наблюдение КоСЭМ эффекта на больших эпицентральных расстояниях (30 градусов и более) особенно важно, так как к этому моменту происходит разделение основных сейсмических фаз. Это даёт возможность выделить возмущения первичных продольной и поперечной объёмных и поверхностных волн.

Во-вторых, в докладе обсуждается природа возникновения КоСЭМ эффекта, производимого удалёнными землетрясениями. Соответствующие физические механизмы можно разделить на два типа. С одной стороны, КоСЭМ возмущения могут быть следствием механического движения постаментов вариометра под воздействием поля смещений сейсмического сигнала. С другой – в некоторых случаях электромагнитное возмущение может возбуждаться сейсмическими волнами непосредственно в породе под обсерваторией.

COSEISMIC EFFECTS OF TELESEISMIC EVENTS

I. M. Alyoshin^{1,3,*}, A. A. Soloviev^{1,3}, A. G. Goev², D. V. Kudin¹

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

²*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

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

**E-mail: ima@ifz.ru*

We are to discuss the characteristics of electromagnetic signals recorded by geomagnetic observatories during the propagation of seismic waves from distant earthquakes. The phenomenon of disturbances accompanying the propagation of mechanical waves in the Earth is known as the coseismic electromagnetic (Co-EM) effect. Seismic waves generated by distant earthquakes can also act as a source of Co-EM signals. These signals are similar in waveform to seismic records. The spectrum of the Co-EM response corresponds to the seismic signal spectrum, with disturbance frequencies in the range 0.01–0.5 Hz.

Manifestations of Co-EM disturbances are frequently observed in magnetotelluric records at relatively short epicentral distances of about 5–8 degrees. Depending on recording conditions, an electromagnetic response is observed for all principal teleseismic phases: compressional and shear body waves, as well as Rayleigh and Love surface waves. Since January 1, 2014, the international INTERMAGNET network has adopted a standard of 1-second data sampling. Observatories within the network are required to provide, in addition to minute data, measurements with a minimum resolution of 1 second (IAGA-2002 format). Among other benefits, new format has created a unique opportunity to register electromagnetic disturbances caused by seismic waves from distant earthquakes at large epicentral distances.

The talk examines several aspects of the Co-EM effect associated with teleseismic events. First, the conditions under which the effect can in principle be observed. The wide distribution of permanent INTERMAGNET observatories with 1-second sampling makes it possible to study the dependence of Co-EM manifestations on earthquake magnitude and epicentral distance. Observations of the Co-EM effect at large epicentral distances (30 degrees or more) are especially important because, at these distances, the main seismic phases become separated. This enables the identification of disturbances associated with primary compressional and shear body waves as well as surface waves.

Second, the report discusses the nature of the Co-EM effect produced by distant earthquakes. The relevant mechanisms can be divided into two types.

РОИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАК ИНДИКАТОР ПОДЛЕДНОЙ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В ЗАПАДНОЙ АНТАРКТИДЕ

Н. В. Андреева*, А. А. Баранов

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

*E-mail: znv@ifz.ru

Изучение вулканизма Антарктиды в наши дни продвигается быстрыми темпами. За последние годы на континенте было обнаружено около сотни вулканов, многие из которых полностью погребены под ледяным щитом. Вопрос об активности подледных вулканов очень важен с точки зрения стабильности ледникового щита над ними. Активность подледных вулканов может увеличивать подледный тепловой поток, что вызывает подплавление ледового щита и ускорение движения льда в регионах с современной вулканической активностью. Многие вулканы проявляют себя сейсмическими роями событий с небольшими магнитудами. Таким образом сейсмические рои подо льдом сигнализируют об активизации подледного вулканизма в исследуемом районе, что может приводить к подплавлению ледника снизу.

Для исследования связи современного вулканизма Антарктиды с ее сейсмичностью и роями землетрясений наряду с известными крупными каталогами, такими как USGS [1] и ISC [2, 3] были использованы данные из нового каталога землетрясений для Антарктиды Castro et al. [4], содержащего около 60000 событий за период с 2000 до 2020 гг. со слабыми магнитудами от -1.0 до 4.5 . Анализ этих данных позволил выявить 11 роёв землетрясений. Обращает на себя внимание связь слабой сейсмичности, в виде выделенных роёв землетрясений, с известными для Антарктического континента вулканическими областями.

Тем не менее, в районе двух сейсмических роёв, из 11 рассматриваемых, данные о вулканах отсутствуют. В анализируемом каталоге Castro et al. [4] отсутствуют сейсмические события на Антарктическом полуострове. Для этой области были использованы данные из каталога ISC [2, 3], согласно которым на Антарктическом полуострове от Земли Грейама до острова Аделейд выделяется ещё один сейсмический рой. Данных о наличии вулканов в этой области не имеется.

На основе обнаруженных сейсмических роёв землетрясений авторы высказывают предположение о наличии неизвестных ранее подлёдных вулканов в трёх районах: на Антарктическом полуострове, границе ледника Росса и моря Росса, а так же чуть южнее западной границы континента по 150° долготы.

Литература

1. Ekström G., Nettles M., Dziewonski A.M. The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes // *Phys. Earth Planet.* 2012. In. 200–201. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2012.04.002>.
2. Storchak D.A., Giacomo D.D., Engdahl E.R. et al. The ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2009): Introduction // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2015. Vol. 239. P. 48–63. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2014.06.009>
3. Giacomo D.D., Engdahl E.R., Storchak D.A. The ISC-GEM Earthquake Catalogue (1904–2014): status after the Extension Project // *Earth System Science Data*. 2018. Vol. 10 (4). P. 1877–1899. <https://doi.org/10.5194/essd-10-1877-2018>
4. Castro A.F., Schmandt B.J., Nakai R.C., Aster J. Chaput. (Re)Discovering the Seismicity of Antarctica: A New Seismic Catalog for the Southernmost Continent // *Seismol. Res. Lett.* 2024. Vol. XX. P. 1–19. <https://doi.org/10.1785/0220240076>

EARTHQUAKE SWARMS AS AN INDICATOR OF SUBGLACIAL VOLCANIC ACTIVITY IN WEST ANTARCTICA

N. V. Andreeva*, A. A. Baranov

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

**E-mail: znv@ifz.ru*

The study of Antarctica's volcanism is progressing rapidly these days. In recent years, about a hundred volcanoes have been discovered on the continent, many of which are completely buried under the ice sheet. The question of the activity of subglacial volcanoes is very important from the point of view of the stability of the ice sheet above them. The activity of subglacial volcanoes can increase the subglacial heat flow, which causes melting of the ice sheet and acceleration of ice movement in regions with modern volcanic activity. Many volcanoes manifest themselves as seismic swarms of events with small magnitudes. Thus, seismic swarms under the ice signal the activation of subglacial volcanism in the studied area, which can lead to melting of the glacier from below.

To study the relationship of modern volcanism in Antarctica with its seismicity and earthquake swarms, along with well-known large catalogs such as the USGS and ISC, we used data from the new catalog of earthquakes for Antarctica by Castro et al, containing about 60000 events from 2000 to 2020 with weak magnitudes from -1.0 to 4.5. The analysis of these data revealed 11 swarms of earthquakes. Attention is drawn to the connection of weak seismicity, in the form of isolated swarms of earthquakes, with volcanic areas known for the Antarctic continent.

However, there is no data on volcanoes in the area of two of the 11 seismic swarms under consideration. The analyzed catalog by Castro et al., 2024 does not contain seismic events on the Antarctic Peninsula. For this area, data from the ISC catalog were used, according to which another seismic swarm stands out on the Antarctic Peninsula from Graham Land to Adelaide Island. There is no evidence of volcanoes in this area.

Based on the detected seismic swarms of earthquakes, the authors suggest the presence of previously unknown subglacial volcanoes in three areas: on the Antarctic Peninsula, on the border of the Ross Glacier and the Ross Sea, as well as just south of the western border of the continent at 150 longitude.

РЕАКЦИЯ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА НЕЛИНЕЙНЫЕ ДЛИННЫЕ ВОЛНЫ В ОКЕАНЕ

С. А. Арсеньев*

¹*Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия*

*E-mail: arsy7@mail.ru

Воздействие океана на земную кору гораздо значительнее, чем воздействие атмосферы, поскольку вода примерно в 1000 раз тяжелее воздуха. Сила удара океанского прибоя может достигать 50 000 кг на 1 м² прибрежной скалы. В прибрежных районах океана гравитационные волны на воде считаются сейсмообразующим фактором, вызывающим микросейсмы. В открытом океане, на глубинах порядка 4000 м, влияние поверхностных ветровых волн на земную кору отсутствует, поскольку связанные с ними движения экспоненциально затухают с удалением от поверхности и проникают только на глубины порядка 100 м. Длинные волны, такие как приливы, штормовые нагоны и планетарные волны, достигают дна океана и могут оказывать на него избыточное давление. Однако амплитуды этих волн невелики, а давление незначительно. Исключение составляют волны цунами, амплитуда которых иногда достигает сотен метров. В нашей работе мы нашли значение давления на дно океана (моря) от цунами в виде нелинейных одиночных волн на воде. Нелинейность в волнах на воде является существенной, поскольку волновое давление на океанское дно содержит негидростатические составляющие. Наша математическая модель, основанная на нелинейных уравнениях идеальной жидкости без трения, позволяет нам рассчитать дополнительное, сверх гидростатическое давление на земную кору. Оно зависит от амплитуды одиночных волн и глубины океана. Избыточное волновое давление в среднем составляет 50% от гидростатического давления на мелководных океанских шельфах. Таким образом, цунами, вызванное одиночными волнами, может спровоцировать новые землетрясения, поскольку избыточные напряжения влияют на очаг землетрясения. Расчетный пример показывает изменения динамического давления после прибытия цунами. В качестве примера приводится случай обрушения в фиорд Дикси в Гренландии большого массива береговых скал. В фиорде возникла длинная волна, которая в течение 9 дней плескалась, вызывая сейсмический грохот, фиксируемый сейсмографами в США. Очаг возникшего землетрясения был в Гренландии, а магнитуда возникшего землетрясения была порядка 5.

EARTHQUAKE FOCI RESPONSE TO NONLINEAR LONG WAVES IN THE OCEAN

S. A. Arsen'yev*

Schmidt institute of physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: arsy7@mail.ru

The impact of the ocean on the Earth's crust is much greater than the impact of the atmosphere, as water is approximately 1,000 times heavier than air. The force of an ocean wave can reach up to 50,000 kilograms per square meter of coastal rock. In coastal areas of the ocean, gravitational waves on water are considered a seismogenic factor that causes microseisms. In the open ocean, at depths of about 4,000 m, there is no effect of surface wind waves on the earth's crust, as the associated motions decay exponentially with distance from the surface and penetrate only to depths of about 100 m. Long waves, such as tides, storm surges, and planetary waves, reach the ocean floor and can exert excess pressure on it. However, the amplitudes of these waves are small, and the pressure is insignificant. The exception is tsunami waves, which can have amplitudes of up to hundreds of meters. In our work, we found the value of the pressure on the ocean (sea) floor from a tsunami in the form of nonlinear single waves on the water. Nonlinearity in water waves is significant because wave pressure on the ocean floor contains non-hydrostatic components. Our mathematical model, based on nonlinear equations of an ideal frictionless fluid, allows us to calculate the additional, super-hydrostatic pressure on the Earth's crust. It depends on the amplitude of single waves and the depth of the ocean. Excess wave pressure is on average 50% of the hydrostatic pressure on shallow ocean shelves. Thus, a tsunami caused by single waves

can trigger new earthquakes, as excess stresses affect the earthquake's epicenter. A calculated example shows the changes in dynamic pressure after the arrival of a tsunami. As an example, consider the collapse of a large mass of coastal rocks into the Diksy Fjord in Greenland. This caused a long wave in the fjord, which lapped for nine days, causing seismic rumblings that were recorded by seismographs in the United States. The earthquake originated in Greenland, and its magnitude was around 5.

ПОЗДНЕКАЙНОЗОЙСКОЕ ПОДНЯТИЕ ГОР ГАМБУРЦЕВА В РЕЗУЛЬТАТЕ ОТРЫВА ЛИТОСФЕРНОГО КОРНЯ

А. А. Баранов^{1,*}, Л. И. Лобковский², А. М. Бобров¹, А. Н. Марков³

¹Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

²Институт океанологии имени П. П. Ширшова Российской академии наук, Москва, Россия

³Китайский университет наук о Земле, Пекин, Китай

*E-mail: baranov@ifz.ru

Существование подледных гор Гамбурцева в центре Восточной Антарктиды впервые было подтверждено советскими учеными в 1958 г. с помощью сейсмических исследований. Этот регион считается одной из стабильных тектонических зон на планете. Казалось бы, никаких гор здесь быть не должно, тем более с относительно молодым, так называемым альпийским рельефом, установленным по данным радарных исследований (модель BEDMAP 3). Предполагается, что горы Гамбурцева начали формироваться около 650 млн лет назад при континентальной коллизии, достигли пика — высот, сравнимых с Гималаями — примерно 580–550 млн лет назад, а дальше начались процессы эрозии и разрушения.

Авторами предлагается геодинамическая модель поднятия внутриплитного орогена Гамбурцева в позднем кайнозое. Для этого численно рассчитывается 3D-модель мантийной конвекции с переменной вязкостью и плитной реологией на поверхности, основанная на глобальной модели сейсмической томографии SMEAN 2. В настоящее время в южном полярном регионе структура мантийных течений следующая. Распространение вещества от нижнемантийного плюма под Южной Африкой на юг формирует глобальную конвекционную ячейку. Горячее вещество в нижней мантии поднимается субвертикально, далее его часть в верхней мантии движется субгоризонтально на юг, доходя и частично размывая снизу континентальный блок Восточной Антарктиды, и примерно в ее центре в районе гор Гамбурцева вещество погружается в мантию, замыкая эту конвекционную ячейку. В нижней мантии под горами Гамбурцева на глубине около 800–1000 км видна область отрицательных температурных аномалий, которая может быть интерпретирована как область холодного вещества, погружающегося в мантию. Предполагается, что уже после оледенения этого региона произошел отрыв этой капли холодного вещества под горами Гамбурцева. Эта капля стала погружаться в мантию под действием собственного веса, а горы Гамбурцева поднялись на поверхности за счет изостатической компенсации. В свою очередь прочность докембрийской континентальной литосферы ранее была ослаблена за счет процессов рифтогенеза и растекания плюмового вещества под литосферой в процессе и после распада Гондваны. При средней скорости погружения вещества в 5 см/год холодное вещество окажется на глубине 800–1000 км примерно за 10–20 млн лет. Таким образом, современное поднятие гор Гамбурцева произошло 10–20 млн лет назад, а триггером поднятия послужил отрыв литосферного корня под горами. При этом малоподвижный в этом районе ледовый щит предохранил их от дальнейшей эрозии. В настоящее время глубина до границы Мохо под горами Гамбурцева в Восточной Антарктиде составляет примерно 50–58 км. Легкие орогенные корни из континентальной коры поддерживают горный рельеф подо льдом. В случае таяния ледового щита горы еще увеличат свою высоту за счет изостатического поднятия. Предложенный механизм быстрого поднятия орогенов за счет отрыва литосферного корня универсален и может быть применен для различных горных систем (Кавказ, Тибет и др.).

LATE CENOZOIC UPLIFT OF THE GAMBURTSEV MOUNTAINS AS A RESULT OF THE DETACHMENT OF A LITHOSPHERIC ROOT

A. A. Baranov^{1,*}, L. I. Lobkovsky², A. M. Bobrov¹, A. N. Markov³

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

²*Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³*China University of Geosciences, Beijing, China*

*E-mail: baranov@ifz.ru

The existence of the subglacial Gamburtsev Mountains in central East Antarctica was first confirmed by Soviet scientists in 1958 using seismic surveys. This region is considered one of the planet's stable tectonic zones. It would seem that no mountains should exist here, especially with the relatively young, so-called alpine relief established by radar data (the BEDMAP 3 model). It is believed that the Gamburtsev Mountains began to form approximately 650 million years ago during continental collision, reached their peak—elevations comparable to the Himalayas—approximately 580–550 million years ago, and were subsequently subject to erosion and destruction.

The authors propose a geodynamic model for the uplift of the intraplate Gamburtsev Orogen in the Late Cenozoic. To this end, a 3D model of mantle convection with variable viscosity and plate rheology at the surface is numerically calculated, based on the SMEAN 2 global seismic tomography model. Currently, the structure of mantle flows in the south polar region is as follows. The southward propagation of material from the lower mantle plume beneath South Africa forms a global convection cell. Hot material in the lower mantle rises subvertically, then its portion in the upper mantle moves subhorizontally southward, reaching and partially eroding the continental block of East Antarctica from below. Approximately at its center in the Gamburtsev Mountains region, the material submerges into the mantle, closing this convection cell. In the lower mantle beneath the Gamburtsev Mountains, at a depth of approximately 800–1,000 km, a region of negative temperature anomalies is visible. This region can be interpreted as a region of cold material sinking into the mantle. It is believed that after glaciation in this region, a drop of cold material broke off beneath the Gamburtsev Mountains. This drop began to sink into the mantle under its own weight, and the Gamburtsev Mountains rose to the surface due to isostatic compensation. The strength of the Precambrian continental lithosphere, in turn, was previously weakened by rifting and the spreading of plume material beneath the lithosphere during and after the breakup of Gondwana. At an average sinking rate of 5 cm/year, the cold material would reach a depth of 800–1,000 km in approximately 10–20 million years. Thus, the modern uplift of the Gamburtsev Mountains occurred 10–20 million years ago, triggered by the detachment of a lithospheric root beneath the mountains. The relatively sedentary ice sheet in this area protected them from further erosion. Currently, the depth to the Moho boundary beneath the Gamburtsev Mountains in East Antarctica is approximately 50–58 km. Light orogenic roots from the continental crust support the mountainous relief beneath the ice. If the ice sheet melts, the mountains will further increase in height due to isostatic uplift. The proposed mechanism for the rapid uplift of orogens due to the detachment of a lithospheric root is universal and can be applied to various mountain systems (the Caucasus, Tibet, etc.).

**СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ
ПРИ РОСТЕ ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ**

Н. А. Барышников*, С. Б. Турунтаев

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: nabarysh@gmail.com*

Целью работы является оценка возможности восстановления параметров напряжённого состояния горного массива по динамике микросейсмических событий, сопровождающих закачку жидкости в пласт. Исследование направлено на разработку метода анализа данных микросейсмического мониторинга, проводимого в ходе различных технологических процессов, связанных с закачкой флюида в пласт, включая поддержание пластового давления, закачку промысловых вод и захоронение углекислого газа. В ходе таких операций регистрируются микросейсмические события, формирующие локальные кластеры вблизи зон изменения порового давления. Предполагается, что форма зависимости относительного числа событий от порового давления содержит информацию о структуре главных напряжений и может быть использована для восстановления компонент тензора напряжений, прежде всего промежуточного главного напряжения. Предлагаемый метод основан на статистическом моделировании (метод Монте-Карло) ансамбля трещин-инициаторов с заданным распределением ориентаций их нормалей. В условиях исходного фрикционного равновесия рост порового давления приводит к последовательной потере устойчивости трещин различной ориентации, а эволюция микросейсмической активности интерпретируется как результат геометрического взаимодействия окружностей Мора с критерием Мора–Кулона при изменении эффективных нормальных напряжений. На основе моделирования формируются синтетические выборки кривых зависимости относительного числа событий от порового давления, используемые для последующего анализа их формы и информативности. Показано, что на кривых зависимости относительного числа микросейсмических событий от порового давления формируются характерные локальные максимумы, обусловленные касанием различных окружностей Мора линией критерия прочности. Их положение и последовательность появления определяются величинами главных напряжений, тогда как степень выраженности контролируется анизотропией ориентировок потенциальных плоскостей скольжения. При умеренной анизотропии распределения трещин форма кривых сохраняет устойчивые геометрические признаки, позволяющие выделять характерные поровые давления, связанные с компонентами тензора напряжений; при выраженной кластеризации ориентировок информативность таких зависимостей существенно снижается. Проведен анализ влияния объёма микросейсмических данных на устойчивость получаемых оценок. Установлено, что с увеличением числа зарегистрированных событий снижается неопределённость в определении положений локальных максимумов, что повышает надёжность восстановления промежуточного главного напряжения и коэффициента Лоде–Надаи. Таким образом, динамика микросейсмических кластеров, формирующихся при закачке флюида, может рассматриваться как дополнительный источник информации о напряжённом состоянии и внутренней структуре пласта. Предлагаемый подход ориентирован на решение прикладных задач, связанных с оценкой горизонтальных напряжений и снижением геомеханических рисков при подземных технологических воздействиях.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012100531-7).

STATISTICAL MODELING OF MICROSEISMIC EVENT DYNAMICS DURING PORE PRESSURE INCREASE FOR STRESS STATE PARAMETER RECONSTRUCTION

N. A. Baryshnikov*, S. B. Turuntaev

Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Science, Moscow, Russia

**E-mail: nabarysh@gmail.com*

The objective of this study is to assess the possibility of reconstructing the stress state parameters of a rock mass from the dynamics of microseismic events accompanying fluid injection into a reservoir. The research is aimed at developing a method for analyzing microseismic monitoring data acquired during various technological operations involving fluid injection into geological formations, including reservoir pressure maintenance, wastewater disposal, and carbon dioxide sequestration. During such operations, microseismic events are recorded, forming local clusters in the vicinity of zones affected by pore pressure increase. It is assumed that the shape of the relationship between the relative number of events and pore pressure contains information about the structure of the principal stresses and can be used to reconstruct the components of the stress tensor, primarily the intermediate principal stress. The proposed method is based on statistical modeling (Monte Carlo approach) of an ensemble of potential fracture initiators with a prescribed distribution of normal orientations. Under initial frictional equilibrium conditions, an increase in pore pressure leads to the sequential loss of stability of fractures with different orientations, while the evolution of microseismic activity is interpreted as the result of geometric interaction between Mohr circles and the Mohr–Coulomb failure criterion as effective normal stresses change. Based on the modeling results, synthetic datasets of curves representing the relationship between the relative number of events and pore pressure are generated and used for subsequent analysis of their shape and informativeness. It is shown that these curves exhibit characteristic local maxima associated with the tangency of different Mohr circles to the failure envelope. The position and sequence of these maxima are determined by the magnitudes of the principal stresses, whereas their prominence is controlled by the anisotropy of the orientation distribution of potential slip planes. Under moderate anisotropy of fracture orientations, the curves retain stable geometric features that allow identification of characteristic pore pressures related to the components of the stress tensor; under strong clustering of orientations, the informativeness of such relationships significantly decreases. The influence of the volume of microseismic data on the robustness of the obtained estimates is also analyzed. It is established that as the number of recorded events increases, the uncertainty in determining the positions of local maxima decreases, thereby improving the reliability of reconstructing the intermediate principal stress and the Lode–Nadai coefficient. Thus, the dynamics of microseismic clusters formed during fluid injection may be considered as an additional source of information on the stress state and internal structure of the reservoir. The proposed approach is oriented toward practical applications related to the estimation of horizontal stresses and the mitigation of geomechanical risks during subsurface technological operations.

ОЦЕНКИ МЕХАНИЗМОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ГЕОМАГНИТНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ В ЛЭП НА ОСНОВЕ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА 11 ЛЕТ

В. Б. Белаховский¹ *, В. А. Пилипенко², В. Н. Селиванов³, Я. А. Сахаров¹

¹Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

²Институт физики Земли имени О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

³Центр физико-технических проблем энергетики Севера – филиал Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ЦЭС КНЦ РАН), Апатиты, Россия

*E-mail: belakhov@mail.ru

В данной работе проанализированы случаи с экстремальными значениями геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ) в линиях электропередач (ЛЭП) Мурманской области, Карелии и рассмотрены источники их возбуждения в ионосфере, магнитосфере Земли, солнечном ветре. Создана база данных экстремальных значений ГИТ в линиях электропередач (ЛЭП) за 11 лет наблюдений (2012–2022 гг.). Система регистрации ГИТ создана Полярным геофизическим институтом и Центром физико-технических проблем энергетики Севера ФИЦ КНЦ РАН и включает в себя 5 станций. При анализе событий рассматривались данные по регистрации ГИТ с авроральной станции Выходной (VKH) и субавроральной станции Кондопога (KND). База данных включает 95 событий по данным станции VKH ($|GIC| > 20$ Ампер), 45 событий по данным станции KND ($|GIC| > 5$ Ампер). Для регистрации вариаций геомагнитного поля использованы данные обсерватории ПГИ «Ловозеро» (LOZ) и данные станции Mekrijärvi (МЕК), входящую в сеть IMAGE.

Анализ показывает, что как для станции VKH, так и для станции KND экстремальные события ГИТ в основном вызваны суббурями (>80% случаев), которые примерно с равной вероятностью наблюдаются в послеполуночном и в вечернем секторах MLT. При этом развитие вихревых токовых систем во время суббури (P_{i3}-P_{s6}/P_{i2} пульсаций) может давать заметный вклад в рост ГИТ для ЛЭП, ориентированной в направлении север-юг. Дневные и утренние события ГИТ вызваны положительными магнитными бурями, P_{s5} геомагнитными пульсациями, SSC импульсом.

Показано, что во время СМЕ магнитной бури наибольшее число экстремальных событий ГИТ происходит во время главной фазы магнитной бури.

В среднем амплитуда ГИТ растет с ростом интенсивности магнитной бури ($|SYM-H|$), ростом dB/dt , ростом IE индекса. При этом связь амплитуды ГИТ с параметрами солнечного ветра, межпланетного магнитного поля (V , B_z , E_s , ϵ), индексами геомагнитной активности (SYM-H, AE, IE) имеет сильно нелинейный характер. Это говорит о сложности прогноза ГИТ на основании этих параметров, поскольку амплитуда ГИТ определяется в целом не глобальными характеристиками магнитосферы, а локальными ионосферными токами. Из всех рассмотренных параметров наиболее высокая корреляция амплитуды ГИТ наблюдается с максимальным значением IE индекса.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-17-20038, <https://rscf.ru/project/25-17-20038/>) и гранта Министерства образования и науки Мурманской области.

ESTIMATES OF THE MECHANISMS OF EXCITATION OF EXTREME VALUES OF GEOMAGNETICALLY INDUCED CURRENTS IN POWER LINES BASED ON OBSERVATIONS OVER 11 YEARS

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

¹*Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia*

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

³*Center for Physical and Technical Problems of Northern Energy, Kola Science Center Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia*

The paper analyzes extreme values of geomagnetically induced current (GICs) in power transmission line (PTL) in the Murmansk region and Karelia, and examines their sources in the Earth's ionosphere, magnetosphere, and solar wind.

A database of extreme GIC values in PTL over 11 years of observation (2012-2022) has been created. The GIC registration system was created by the Polar Geophysical Institute and the Center for Physical and Technical Problems of Northern Energy of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences and includes 5 stations. The event analysis included GIC registration data from the Vykhnodny auroral station (VKH) and the Kondopoga subauroral station (KND). The database includes 95 events from the VKH station ($|GIC| > 20$ Amps) and 45 events from the KND station ($|GIC| > 5$ Amps). To record variations in the geomagnetic field, data from the Lovozero Observatory (LOZ) and data from the Mekrijärvi station (MEK), which is part of the IMAGE network, were used.

The analysis shows that for both the VKH and KND stations, extreme GIC events are primarily caused by substorms (>80% of cases), which are observed with approximately equal probability in the post-midnight and evening MLT sectors. Moreover, the development of vortex current systems during substorms (Pi3-Ps6/Pi2 pulsations) can significantly contribute to the GICs increase for north-south-oriented transmission lines. Daytime and morning GIC events are caused by positive magnetic bays, Pc5 geomagnetic pulsations, and SSC impulses.

It is shown that during a CME magnetic storm, the greatest number of extreme GIC events occurs during the main phase of the magnetic storm.

On average, the GIC amplitude increases with increasing magnetic storm intensity ($|SYM-H|$), dB/dt , and the IE index. The relationship between the GIC amplitude and solar wind parameters, the interplanetary magnetic field (V , B_z , E_s , ϵ), and geomagnetic activity indices (SYM-H, AE, IE) is highly nonlinear. This indicates the difficulty of predicting the GIC based on these parameters, since the GIC amplitude is generally determined not by global magnetospheric characteristics, but by local ionospheric currents. Of all the parameters considered, the highest correlation between the GIC amplitude and the maximum IE index is observed.

ГЕТЕРОГЕННОСТЬ СЛЭБА КАК ВАЖНЫЙ ПАРАМЕТР ФОРМИРОВАНИЯ ВУЛКАНИЗМА КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ОСТРОВНОЙ ДУГИ

О. В. Бергаль-Кувикас*

Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук, Петропавловск-Камчатский, Россия

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

Курило-Камчатская островная дуга (ККОД) образует Северо-Западную часть Тихоокеанского огненного кольца. ККОД берет свое начало от зоны сочленения с Алеутской островной дугой на севере и зоны сочленения с Северо-Восточной дугой Хонсю на юге. ККОД имеет длительную эволюцию образования, включая аккрецию разновозрастных террейнов на севере Камчатки и долгоживущую систему Южной Камчатки, переходящей к островной дуге Курильских островов с задуговым бассейном. В работе рассмотрены геофизические параметры слэба (возраст, скорость движения, угол погружения), проведена корреляция с проявлениями вулканизма (объемы построек, объемы эксплозивного материала для кальдерных комплексов, высоты вулканических построек). Аргументировано существование аномального проявления моногенного вулканизма наряду с геофизическими наблюдениями в Малко-Петропавловской зоне поперечных дислокаций, образованной на границе аккреции Кроноцкой палеодуги. Отсутствие вулканизма на о. Шумшу и переход от континентальной окраины Камчатки к островной дуге Курильских островов возможно объясним наличием прибрежного вулканического комплекса в основании Южной Камчатки и погружающей подводной возвышенности на границе перехода. Изменение угла наклона слэба формирует различную ширину вулканического пояса на севере и юге Курил. Резкие изменения скорости движения слэба в центральном сегменте Курил, возможно, генерируют рифтовую систему пролива Буссоль. Высказывается предположение о доминирующей роли задугового бассейна в формировании различных параметров слэба и проявлений вулканизма вдоль Курильских островов.

В контексте землетрясения, происшедшего 30 июля 2025 г., рассматривается вопрос о потенциальной связи сейсмичности слэба и активизации отдельных вулканов ККОД. На основании исторических наблюдений приводятся ряд примеров землетрясений и активности вулканов, происшедших в близких временных интервалах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-77-10019-П, <https://rscf.ru/project/22-77-10019-П/>).

SLAB HETEROGENEITY AS AN IMPORTANT PARAMETER OF VOLCANISM FORMATION IN THE KURIL-KAMCHATKA ISLAND ARC

O. V. Bergal-Kuvikas*

Institute of volcanology and seismology Far Eastern Branch of Russian Academy of Science, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

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

The Kuril-Kamchatka Island Arc (KKIA), which forms the northwestern part of the Pacific Ring of Fire, originates from the junction zones with the Aleutian Island Arc in the north and the Northeastern Honshu Arc in the south. It has undergone a long-term process of formation, involving the accretion of terranes of different ages in northern Kamchatka and the development of a long-lived volcanic system in southern Kamchatka that extends to the Kuril Island Arc and its back-arc basin. This paper examines the geophysical characteristics of the subducting slab, including its age, speed of descent, and angle of subduction, and correlates them with volcanic activity in the region. Specifically, it looks at the volumes of volcanic edifices, the amounts of explosive material in caldera complexes, and the heights of volcanic structures. The existence of anomalous manifestations of monogenic volcanism, along with geophysical observations, in the Malko-Petropavlovsk

transverse dislocation zone, formed on the accretion boundary of the Kronotsky paleo arc. This absence of volcanism on the island and the transition from the continental margin of Kamchatka to the island arc of the Kuril Islands, can be explained by the presence of a Pribrezhny volcanic complex at the base of southern Kamchatka and a submerged seamount on the border of this transition. The change in the angle of slope of the slab results in a different width of the volcanic belt in the northern and southern parts of the Kuril Islands. Sudden changes in the speed of slab movement in the central segment of the Kuril islands may have generated the rift system in the Bussol Strait. An assumption is made regarding the dominant role of back-arc basins in the formation of various parameters of slabs and manifestations of volcanic activity along the Kuril island chain.

In the context of the earthquake that occurred on July 30, 2025, we are considering the potential relationship between seismicity in the crust and the activation of individual volcanoes in the KKIA. Based on historical observations, we have provided a number of examples of earthquakes and volcanic activity that occurred within close time intervals.

ПОВТОРЯЮЩИЕСЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

А. Н. Беседина^{1,*}, Ц. А. Тубанов^{2,3}

¹Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

²Геологический институт им. Н. Л. Добрецова Сибирского отделения Российской академии наук, Улан-Удэ, Россия

³Бурятский филиал ФГБУН Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук»

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

Повторяющиеся землетрясения представляют собой события, которые приурочены к одному и тому же участку разломной зоны, имеют практически идентичные волновые формы и происходят с некоторой периодичностью. Повторяющиеся землетрясения впервые были зафиксированы в Северной Калифорнии, и к настоящему времени были задокументированы в различных разломных зонах и тектонических условиях. Чаще всего повторяющиеся землетрясения встречаются на крипующих участках разломов, где сейсмические области нагружаются вследствие медленного скольжения, поэтому подобные события можно использовать для отслеживания скорости скольжения разлома на глубине и уточнения структурных особенностей разломной зоны.

В данной работе проведен анализ волновых форм землетрясений, зарегистрированных сетью станций Бурятского филиала ФИЦ ЕГС РАН и ГИН СО РАН, за 2001–2021 гг. На первом этапе была создана база данных событий, для которых коэффициент корреляции был более 0.7 для группы Р- и S- волн для всех пар событий, находящихся на расстоянии менее 10 км друг от друга для центральной части Байкальской рифтовой зоны. Далее отобранные события использовались для выделения повторяющихся землетрясений на основе сформированных критериев. В качестве критериев для выделения повторяющихся землетрясений предлагается рассматривать: перекрытие очаговых областей рассматриваемых событий в приближении круговой трещины, разницу магнитуд (классов) в пределах 1, а также значения коэффициента корреляции волновых форм двух событий более 0.9.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-17-00204-н).

REPEATING EARTHQUAKES OF THE CENTRAL PART OF BAIKAL RIFT

A. N. Besedina^{1,*}, T. A. Tubanov^{2,3}

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

²Dobretsov Geological Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russia

³Buryat Regional Seismological Centre of Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russia

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

Repeating earthquakes are events confined to the same section of the fault zone, have almost identical waveforms, and occur periodically. Repeating earthquakes were first recorded in Northern California and have since been documented in various fault zones and tectonic settings. Repeating earthquakes most frequently occur on creeping fault sections, where seismic zones are loaded due to slow slip. Therefore, such events can be used to track fault slip rate at depth and clarify the structural features of the fault zone.

This paper analyzes earthquake waveforms recorded by the network of stations of the Buryat Branch of the Federal Research Center of Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences and the Geological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences for 2001–2021. At the first stage, a database of events with a correlation coefficient greater than 0.7 for the P- and S- waves was created for all pairs of events located less than 10 km apart in the central part of the Baikal Rift Zone. The selected events were then used to identify repeating earthquakes based on the developed criteria. The following criteria are proposed for identifying repeating earthquakes: overlapping of the source regions of the events under consideration in the circular fracture approximation, a magnitude (class) difference of within 1, and a waveform correlation coefficient greater than 0.9 between the two events.

РЕЗУЛЬТАТЫ НА ОСНОВЕ СЕЧЕНИЙ ТОМОГРАФИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СОВРЕМЕННОЙ ЗЕМЛИ: ГРАНИЦЫ В НИЖНЕЙ МАНТИИ; ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ

А. М. Бобров^{1,*}, Л. И. Лобковский², А. А. Баранов^{1,3}

¹Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

²Институт океанологии имени П. П. Ширшова Российской академии наук, Москва, Россия

³Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: n9153227428@gmail.com

Полученные авторами ранее результаты расчетов полей температур и скоростей течений для трехмерной сферической модели мантии современной Земли анализируются с помощью рассмотрения их двумерных сечений различных типов (меридиональные, широтные, сечения на фиксированной глубине).

Сечения поля температур показали, что наряду с выраженной ролью границы на глубине 660 км, вероятное наличие ещё двух границ – на глубинах около 1700 и 2200 км, которые так же воздействуют на субвертикальные течения. Воздействие выражается в частичном торможении течений и их выполаживании при подходе к данным границам с видимым образованием значительных субгоризонтальных областей горячего и холодного материала. Накопление этого материала при достижении порогового значения давления служит, видимо, триггером для прорыва вещества через границу.

Рассчитано также поле скоростей движения вещества мантии во всем ее объеме, на базе которого дан вариант интерпретации особенностей движений литосферы в ряде регионов (Аравия, Кавказ, Мьянма).

По рассчитанным полям температур и скоростей течений найдено также распределение мантийных напряжений сжатия и растяжения, ориентированных в направлении географической широты и долготы. В расчеты включены литосферные плиты на поверхности Земли как специфическая, наиболее высоковязкая часть мантии. Плиты в модели разделены ослабленными зонами, соответствующими зонам субдукции и рифтовым зонам.

Результаты расчетов этих напряжений на поверхности Земли демонстрируют наличие надлитостатических растягивающих напряжений во всей Тихоокеанской плите к западу от Тихоокеанской рифтовой зоны, и сходную картину в области, примыкающей к Андской зоне, и в западной части Северной Атлантики. Евразия, Австралийская плита и Индийский субконтинент показывают в целом напряжения сжатия.

RESULTS BASED ON SECTIONS OF A TOMOGRAPHIC MODEL OF THE MODERN EARTH: BOUNDARIES IN THE LOWER MANTLE; STRESS FIELDS

A. M. Bobrov^{1,*}, L. I. Lobkovsky², A. A. Baranov^{1,3}

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

²Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of Russian academy of sciences, Moscow, Russia

*E-mail: n9153227428@gmail.com

The authors previously obtained results for calculating temperature and flow velocity fields for a three-dimensional spherical model of the modern Earth's mantle are analyzed using various types of two-dimensional sections (meridional; latitudinal; sections at a fixed depth)

Temperature field cross-sections showed, along with the pronounced role of the boundary at a depth of 660 km, the probable presence of two more boundaries at depths of about 1700 and 2200 km, which also

affect sub-vertical flows. This influence is manifested in a partial slowdown of the flows and their flattening as they approach these boundaries, with the visible formation of significant subhorizontal areas of hot and cold material. The accumulation of this material, upon the achievement of a threshold pressure, seems to be the trigger for the material to break through the boundary.

Calculations were also performed for the velocity field of mantle material movement throughout its volume. A version of interpretation of the features of lithospheric movements in several regions (Arabia, the Caucasus, and Myanmar) is provided based on these results.

Mantle stress distribution of compressive and tensile stresses oriented along geographic latitude and longitude was also determined using the calculated temperature and flow velocity fields. The calculations include lithospheric plates on the Earth's surface as a specific, highly viscous part of the mantle. The plates in the model are separated by weak zones, corresponding to subduction and rift zones. The results of these stress calculations at the Earth's surface demonstrate the presence of over-lithostatic tensile stresses throughout the Pacific Plate to the west of the Pacific Rift Zone, and a similar pattern in the area adjacent to the Andean zone and in the western part of the North Atlantic. Eurasia, the Australian Plate, and the Indian Subcontinent exhibit, in general, the compressive stresses.

КВАНТОВЫЙ ТРИГГЕР: ОСОБЕННОСТИ МЕТОДОЛОГИИ И ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ

Л. М. Богомолов*, В. Н. Сычев

Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, Южно-Сахалинск, Россия

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

В разных областях физики случается, когда возмущения, малые по своей энергии, приводят к значительным изменениям в системе. Подобные явления часто объясняются либо резонансом, либо макроскопическими проявлениями квантовых эффектов. Отсюда интерес к описанию триггерных эффектов в квантовой механике. В классической механике простейшей моделью триггерного эффекта может служить потенциальная яма очень малой глубины, соответствующая метастабильному состоянию системы. «Триггер», т.е. переход системы в другое состояние с меньшей энергией, подразумевает наличие второго минимума потенциала. В квантовой механике набор стационарных состояний с дискретными уровнями энергии реализуется даже для одной потенциальной ямы. Любое возмущение потенциала создает некоторую вероятность перехода. Но непродуктивно трактовать все эти переходы как триггерные (если оставить в стороне вопросы с кубитами). В первой части доклада рассматриваются методические вопросы, служащие основой для разграничения собственно триггерных эффектов в квантовой механике от «обычных» для микромира переходов между состояниями. Для наглядности используется одномерное приближение.

Простейшим аналогом триггерного эффекта в квантовой механике может служить переход между стационарными состояниями, вызванный резким («мгновенным») изменением потенциала, причем возмущение существенно меньше разности энергии стационарных состояний. Особое внимание уделено случаю, когда малое возмущение вносит асимметрию в форму неглубокой потенциальной ямы, из-за чего исчезает имевшийся в ней энергетический уровень, т.е. захваченная частица высвобождается, переходит в состояние с непрерывным спектром энергий. Гипотетически, это может описывать воздействие электрического поля на облако электрон-дырочных дефектов, окружающих заряженную дислокацию краевого типа и ее последующее движение. Известны эффекты воздействия магнитного поля на так называемый депиннинг дислокаций (отрыв от стопоров), обзор в [1, 2]. Макроскопически это проявляется как увеличение скорости пластической деформации (так называемая магнитопластика). В работах академика А. Л. Бучаченко обосновано, что значительный вклад в эти эффекты вносит фактор спина, из-за которого радикально меняются условия взаимодействия частиц с внешним магнитным полем [3]. Реализуется как бы «информационное», а не энергетическое воздействие. Рассмотренные одномерные модели позволяют предположить аналогичный сценарий при воздействии на нагруженные образцы геоматериалов электрических полей с напряженностью намного меньше 1–10 МВ/м (характерной для автоэлектронной эмиссии).

Характерный масштаб, на котором можно ожидать реализации подобных эффектов определяется условиями соответствия квантовомеханического импульса «частицы» (оператор $p \sim \hbar \text{grad} \sim \hbar/L$) и классического импульса элементарного объема среды, $\langle \rho \rangle v L^3$ (обозначения: $\hbar$ – постоянная Планка, L – наименьший размер задачи, $\langle \rho \rangle$ – плотность, v – массовая скорость среды). Для скоростей от 1 нм/с до 1 мкм/с значения L меняются от 80 до 15 нм, что соответствует характерному размеру для краевых дислокаций (совпадение с масштабом наноструктур случайно).

В завершение тезисов стоит заметить – на одной из конференций «Триггерные эффекты в геосистемах» академик В. В. Адушкин высказался, что докладами охвачены все стороны «триггеров», кроме квантовомеханических моделей. Вот и попробуем обсудить остаток.

Литература

1. Головин Ю.И. Магнитопластичность твердых тел (обзор) // Физика твердого тела. 2004. Т. 46. № 5. С. 769–803.
2. Бучаченко А.Л. Микроволновое стимулирование дислокаций и магнитный контроль очага землетрясения // Успехи физических наук. 2019. Т. 189. № 1. С. 47–54. <https://doi.org/10.3367/ufnr.2018.03.038301>

QUANTUM TRIGGER: SPECIFIC METHODOLOGICAL FEATURES AND THE POSSIBILITY OF USING IT IN GEOMECHANICAL MODELS

L. M. Bogomolov*, V. N. Sychev

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

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

There are numerical cases when perturbations of small energy but giving trigger are explained frequently either by resonance or macroscopic manifestations of quantum effects. So, effect of quantum trigger is of interest. The classical model of the trigger effect may involve a shallow potential pit with metastable state. Such a «trigger» implies the presence of a second potential minimum. In quantum mechanics, a set of stationary states is realized even for a single potential well. Any perturbation of the potential produces a certain probability of transition. But it is unproductive to treat all these transitions as trigger ones. The first part of the presentation discusses methodological issues to distinguish trigger effects in quantum mechanics. For greater clarity, a one-dimensional approximation is used.

The simplest similar pattern of the trigger effect in quantum mechanics can be the transition between stationary states caused by a sharp («instantaneous») change in potential, and the perturbation is significantly less than the energy difference between the stationary states. The simplest analogue of the trigger effect in quantum mechanics can be the transition between stationary states caused by a sharp («instantaneous») change in potential, and the perturbation is significantly less than the energy difference between the stationary states. Special attention is paid to the case when a small perturbation introduces asymmetry into the shape of a shallow potential well, which causes the inner energy level to disappear, and the trapped particle is released. Hypothetically, this could describe the effect of an electric field on a cloud of electron-hole defects surrounding a charged edge-type dislocation and its subsequent movement. The effects of a magnetic field on the so-called dislocation depinning are known, reviewed in. Macro-manifestation of this is an increase in the rate of plastic deformation. In the works of academician A. L. Buchachenko, it is proved that a significant contribution to these effects is made by the spin factor, which radically changes the conditions of interaction of particles with an external magnetic field. It is an «informational» rather than power impact to be occur. The considered one-dimensional models suggest a similar scenario when electric fields with a voltage much less than 1–10 MV/m (typical for autoelectronic emission) are applied to loaded geomaterial specimens.

The typical scale on which such effects is to occur is determined by the conditions of correspondence between the quantum mechanical momentum of the «particle» and the classical momentum of the elementary volume of the medium. For velocities from 1 nm/s to 1 μ m/s, the length L vary from 80 to 15 nm, corresponding to typical scale for edge dislocations.

Finally, it is worth noting that academician V. V. Adushkin said previously that the topical reports cover all aspects of «triggers», except quantum models. So, let's try to discuss the rest.

ГЛУБОКИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ СРЕДНЕЙ АЗИИ

В. Ю. Бурмин*, Г. Р. Петросян

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

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

Ранее, в работах В. Ю. Бурмина с соавторами, показано, что в некоторых случаях глубины гипоцентров даются в каталоге ISC с большими ошибками, в частности на Кавказе, Туркмении и Таджикистане. Согласно каталогу ISC очаги землетрясений в этих районах располагаются преимущественно в земной коре, а после переопределения координат гипоцентров, порядка десяти процентов очагов оказываются расположенными в мантии на глубинах до 500 км и глубже. В связи с этим возникла потребность в переопределении координаты землетрясений для других сейсмических регионов и, в частности, для Средней Азии и прилегающим к ней районов Северного Ирана, Афганистана и северо-запада Китая. Сравниваются распределения гипоцентров землетрясений для этих регионов, полученные по данным каталога ISC за период с 1964 по 2021 гг. и результаты пересчёта гипоцентров по данным бюллетеня ISC за этот же период.

Представлены гипоцентры землетрясений, которые после пересчёта имели погрешности в определении глубин не более 20 км. Показано, что глубины очагов землетрясений в рассматриваемых районах могут располагаться на глубинах до 900 км, в то время как по данным каталога ISC максимальные глубины очагов на этих территориях не превосходят 250 км.

Во всех случаях глубины землетрясений, в том числе и глубоких, проверяются решением прямой задачи, то есть расчетом теоретических годографов для соответствующих глубин землетрясений. Причем, эта проверка была предусмотрена на каждом шаге решения задачи определения координат очагов землетрясений.

DEEP EARTHQUAKES IN CENTRAL ASIA

V. Y. Burmin*, G. R. Petrosyan

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

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

Previously, V. Yu. Burmin and his co-authors demonstrated that in some cases, hypocenter depths in the ISC catalog are significant y inaccurate, particularly in the Caucasus, Turkmenistan, and Tajikistan. According to the ISC catalog, earthquake foci in these regions are located predominantly in the Earth's crust. However, after redefining the hypocenter coordinates, approximately ten percent of the foci are located in the mantle at depths of up to 500 km or deeper. This necessitated redefining earthquake coordinates for other seismic regions, particularly Central Asia and adjacent areas of northern Iran, Afghanistan, and northwest China. The distributions of earthquake hypocenters for these regions, obtained from the ISC catalog for the period from 1964 to 2021, are compared with the results of recalculating hypocenters based on the ISC bulletin for the same period.

The hypocenters of earthquakes are presented, which, after recalculation, had depth errors of no more than 20 km. It is shown that earthquake focal depths in the considered regions can be located at depths of up to 900 km, while according to the ISC catalog, maximum focal depths in these territories do not exceed 250 km.

In all cases, earthquake depths, including deep ones, are verified by solving the direct problem, that is, by calculating theoretical traveltime curves for the corresponding earthquake depths. Moreover, this check was provided for at every step of solving the problem of determining the coordinates of earthquake foci.

ПРИМЕНЕНИЕ ГНСС-ТЕХНОЛОГИИ (GPS/ГЛОНАСС) В ГЕОЛОГИИ

М. С. Бурханов*, Д. Кеита

Высший институт горного дела и геологии Боке, Боке, Гвинея

**E-mail: mburhanov65@mail.ru*

Глобальная навигационная спутниковая система GNSS (Global Navigation Satellite System) – это спутниковые системы (наиболее распространены GPS и ГЛОНАСС), используемые для определения местоположения в любой точке земной поверхности с применением специальных навигационных или геодезических приемников. ГНСС технология нашла широкое применение в геодезии, геологии, при инвентаризации земель, строительстве инженерных сооружений и т.д. Основные достоинства и преимущества:

1. Не требуется прямой видимости между пунктами.
2. Благодаря автоматизации измерений сведены к минимуму ошибки наблюдателей.
3. Позволяет круглосуточно при любых погодных условиях определять координаты объектов в любой точке Земного шара.
4. Точность ГНСС определений мало зависит от погодных условий.
5. ГНСС позволяет значительно сократить сроки проведения работ по сравнению с традиционными методами.
6. ГНСС результаты представляются в цифровом виде и могут быть легко экспортированы в картографические или географические информационные системы.

Геодезический GPS приёмник – радиоприёмное устройство для определения географических координат текущего местоположения антенны приёмника, на основе данных о временных задержках прихода радиосигналов [1]. Применение ГНСС в геологии обеспечивает высокоточное позиционирование для полевых исследований, картирования и мониторинга деформаций земной поверхности. Технология используется для привязки скважин, создания цифровых моделей рельефа, изучения тектонических движений, оценки рисков (оползни) и быстрого определения эпицентров землетрясений. Ключевые направления использования ГНСС в геологии:

1. Геологическое картирование и полевые изыскания: Быстрое определение точных координат точек отбора проб, обнажений, геофизических профилей и инженерно-геологических скважин.
2. Изучение тектоники и геодинамики: Мониторинг движений тектонических плит с помощью стационарных приемников, что позволяет изучать деформации земной коры.
3. Мониторинг опасных геологических процессов: Наблюдение за оползнями, просадками грунта, вулканической активностью и деформациями дамб.
4. Сейсмология: Использование GPS данных для быстрого определения магнитуды землетрясений.
5. Создание топографической основы: Оперативное создание цифровых моделей местности и профилей для геологических отчетов.

Развитие ГНСС привело к быстрому развитию новых спутниковых геодезических технологий – от абсолютных определений координат объектов с ошибками 10 и более метров до относительных определений с ошибками в несколько сантиметров. Данные системы в режиме RTK (Real Time Kinematic) обеспечивают точность определения координат с предельной погрешностью также в несколько сантиметров, а в режиме постобработки – не превышающих 1 см. Технология оказалась настолько эффективной, что развитые страны создали сети опорных станций на значительных территориях, предоставляя пользователям измерительную и корректирующую информацию, обеспечивающую точное и надежное определение координат объектов [2].

Основой наземной инфраструктуры систем точного определения пространственных координат с помощью ГНСС являются постоянно действующие базовые станции ГНСС, часто обозначаемые аббревиатурой CORS (Continuous Operation Reference Station). Сеть базовых станций обеспечивает единую пространственно-временную геодезическую основу точных и высокоточных измерений ГНСС. Например, при наблюдениях за деформациями земной коры, создании опорных геодезических сетей для обеспечения топографических работ, точного земледелия, а также для мониторинга за состоянием

природных объектов и сооружений. Сети CORS и GNSS имеют свои преимущества и проблемные ситуации. При проектировании точек CORS необходимо выбрать правильное место для установки, обеспечить отсутствие различных препятствий для приема и распространения волн, и обеспечить их безопасность.

Литература

1. GPS reference stations and networks. An introductory guide. 2005. Leica Geosystems. Heerbrugg, Switzerland.
2. *Евстафьев О.В.* Наземная инфраструктура ГНСС для точного позиционирования. М. : 2009.

APPLICATION OF GNSS TECHNOLOGY (GPS/GLONASS) IN GEOLOGY

M. S. Burhanov*, D. Keita

Higher Institute of Mining and Geology of Boke, Boke, Guinea

**E-mail: mburxanov65@mail.ru*

Global Navigation Satellite Systems (GNSS) are satellite systems (the most common being GPS and GLONASS) used to determine the location of any point on the Earth's surface using specialized navigation or geodetic receivers. GNSS technology has found wide application in geodesy, geology, land inventory, engineering construction, and more. Key advantages and benefits:

1. No direct line of sight between points is required.
2. Automated measurements minimize human error.
3. Allows 24/7 determination of the coordinates of objects anywhere on the globe, in all weather conditions.
4. The accuracy of GNSS determinations is little affected by weather conditions.
5. GNSS significantly reduces the time required for work compared to traditional methods.
6. GNSS results are presented digitally and can be easily exported to cartographic or geographic information systems. A geodetic GPS receiver is a radio receiver used to determine the geographic coordinates of the receiver antenna's current location based on time delays in radio signal arrivals.

The use of GNSS in geology provides high-precision positioning for field surveys, mapping, and monitoring earth surface deformations. The technology is used for borehole locating, creating digital elevation models, studying tectonic movements, assessing risks (landslides), and quickly determining earthquake epicenters. Key areas of GNSS use in geology:

1. Geological mapping and field surveys: Rapidly determine the precise coordinates of sampling points, outcrops, geophysical profiles, and engineering-geological boreholes.
2. Study of tectonics and geodynamics: Monitoring tectonic plate movements using stationary receivers, enabling the study of crustal deformations.
3. Monitoring hazardous geological processes: Monitoring landslides, ground subsidence, volcanic activity, and dam deformations.
4. Seismology: Using GPS data to quickly determine earthquake magnitudes.
5. Topographic baseline creation: Rapidly create digital terrain models and profiles for geological reporting.

The development of GNSS has led to the rapid development of new satellite geodetic technologies – from absolute coordinate determinations of objects with errors of 10 meters or more to relative determinations with errors of a few centimeters. These systems in RTK (Real Time Kinematic) mode provide coordinate accuracy with a marginal error of several centimeters, and in post-processing mode, errors no greater than 1 cm. This technology has proven so effective that developed countries have established networks of reference stations over large areas, providing users with measurement and correction information to ensure accurate and reliable coordinate determination.

The foundation of the ground-based infrastructure for precise spatial coordinate determination systems using GNSS are continuously operating GNSS base stations, often referred to by the acronym CORS (Continuous Operation Reference Station). A network of reference stations provides a unified spatiotemporal geodetic basis for precise and high-precision GNSS measurements.

CORS and GNSS networks each have their advantages and challenges. When designing CORS points, it is important to select the correct installation location, ensure the absence of various obstacles to wave reception and propagation, and ensure their safety.

АНАЛИЗ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛЕЙ СМЕЩЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ РСА-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ В РАЙОНЕ ВОСТОЧНОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО ПОЯСА ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА ПОСЛЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 29.07.2025 г.

М. С. Волкова*, В. О. Михайлов

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

**E-mail: msvolkova6177@gmail.com*

После произошедшего на Камчатке 29.07.2025 г. землетрясения $M_w = 8.8$ (по оценке USGS), началась активизация или усиление деятельности ряда вулканов, расположенных в зоне Восточного вулканического пояса. В этой зоне на всём её протяжении сосредоточено множество активных разломов преимущественно С-В простирания, свидетельствующие о поперечном растяжении Восточного вулканического фронта полуострова [1].

К разломным зонам приурочены некоторые кальдеры и вулканические постройки, и деформация земной коры во время Камчатского землетрясения, вероятно, спровоцировала активизацию отдельных магматических систем. Самым заметным событием стало извержение вулкана Крашенинникова, не подававшего признаков активности более 400 лет.

Методами спутниковой радиолокационной интерферометрии по снимкам спутников Сентинель-1А и 1С с двух орбит рассчитаны поля смещений поверхности полуострова Камчатка, зарегистрированных в результате землетрясения 29.07.2025 г. Анализ смещений в региональном масштабе показал пределы распространения деформаций поверхности вглубь территории полуострова. По снимкам, выполненным в период, включающий момент землетрясения, получено, что самые сильные деформации затухают в районе Карымского вулканического центра. Однако в локальном масштабе зафиксировано сложное деформационное поле на территории кальдеры вулкана Крашенинникова в период, охватывающий момент начала его извержения 02.08.2025 г. Особенно сильно в деформационном поле в кальдере проявляется горизонтальная компонента растяжения. Величина горизонтального смещения поверхности на запад и на восток, вычисленная по данным с двух орбит, достигает 0.6 м в каждом направлении. Вертикальная компонента смещений поверхности вулканической постройки превосходит 0.26 м у вершины Южного конуса. Интерпретация измеренных смещений с помощью численного математического моделирования позволила определить параметры гигантской вертикальной трещины, которая образовалась в кальдере вулкана в процессе внедрения магматического материала из глубинного очага во время извержения. Трещина длиной в 7–8 км проходит почти через центр кальдеры и отклоняется против часовой стрелки от направления север-юг на 12° . Из условия наилучшего согласования теоретических и реальных смещений ширина трещины оценена в 1.5–2.2 м, протяженность по вертикали 2.0–2.9 км, глубина верхней кромки 1.25–1.5 км. Общий объём внедрившегося материала оценен от 0.024 до 0.045 км³.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-17-00064. <https://rscf.ru/project/23-17-00064>).

Литература

1. Kozhurin A., Zelenin E. An extending island arc: The case of Kamchatka // Tectonophysics. 2017. Vol. 706–707. P. 91–102. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2017.04.001>

ANALYSIS AND INTERPRETATION OF DISPLACEMENT FIELDS OBTAINED USING SAR INTERFEROMETRY IN THE AREA OF THE EASTERN VOLCANIC BELT OF THE KAMCHATKA PENINSULA AFTER THE EARTHQUAKE OF JULY 29, 2025

M. S. Volkova *, V. O. Mikhailov

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

**E-mail: msvolkova6177@gmail.com*

After the earthquake Mw8.8 that occurred in Kamchatka on July 29, 2025 (according to USGS estimate), a number of volcanoes located in the Eastern Volcanic Belt began to intensify their activity. In this zone, along its entire length, there are many active faults, mainly of the northeastern strike, indicating the transverse stretching of the Eastern Volcanic Front of the peninsula.

Some calderas and volcanic edifices are associated with fault zones. The deformation of Earth's crust during the Kamchatka earthquake probably triggered the activation individual magmatic systems. The most notable event was the eruption of the Krasheninnikov volcano, which had not shown signs of activity for more than 400 years.

Using satellite radar interferometry methods, the displacement fields of the Kamchatka Peninsula surface recorded as a result of the July 29, 2025 earthquake were calculated from the images of the Sentinel-1A and 1C satellites from two orbits. An analysis of the displacements on a regional scale has shown the limits of the propagation of surface deformations deep into the peninsula. Based on images taken during the period including the moment of the earthquake, it was found that the most severe deformations were attenuated in the area of the Karymsky volcanic center. However, on a local scale, a complex deformation field was recorded on the territory of the Krasheninnikov volcano caldera during the period covering the moment of the beginning of its eruption on August 02, 2025. The horizontal component of stretching is especially pronounced in the deformation field in the caldera. The magnitude of the horizontal displacement of the surface to the west and east, calculated from data from two orbits, reaches 0.6 m in each direction. The vertical component of the surface displacement of the volcanic edifice exceeds 0.26 m at the summit of the Southern Cone. Interpretation of the measured displacements using numerical mathematical modeling made it possible to determine the parameters of a giant vertical fissure that formed in the volcano's caldera during the intrusion of magmatic material from a deep chamber during the eruption. A 7–8 km long fissure runs almost through the center of the caldera and deviates counterclockwise from the north-south direction by 12 degree. Based on the best agreement between theoretical and actual displacements, the crack width is estimated at 1.5–2.2 m, the vertical length at 2.0–2.9 km, and the upper edge depth at 1.25–1.5 km. The total volume of intruded material is estimated at 0.024 to 0.045 km³.

**ИНДИКАТОРЫ ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОЙ СТАДИИ ПОДГОТОВКИ КАМЧАТСКОГО
МЕГАЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 29.07.2025 г.**

В. А. Гаврилов*, Ю. Ю. Бусс, Е. В. Полтавцева, Ю. В. Морозова, И. А. Сагарьяров

Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук, Петропавловск-Камчатский, Россия

**E-mail: vgavr1403@mail.ru*

Созданная в районе Петропавловска-Камчатского Сеть комплексных скважинных измерений в настоящее время обеспечивает непрерывный мониторинг процессов подготовки сильных землетрясений в зоне Авачинского залива по семи видам скважинных измерений. В их число входят, в том числе, электромагнитные измерения с подземными электрическими антеннами; геоакустические измерения на глубинах до 1000 м; мониторинг изменений газонасыщенности и удельной электропроводности воды скважин; измерения температуры и уровня воды скважин. Указанная сеть специально создавалась для обеспечения непрерывного мониторинга процессов подготовки сильных землетрясений в зоне Авачинского залива, опасных для района Петропавловск-Камчатской городской агломерации. Толчком к началу создания Сети (2000 г.) послужили долгосрочные сейсмические прогнозы академика С. А. Федотова с коллегами, в которых наиболее вероятным местом очередного сильнейшего землетрясения ($M \geq 7.7$) для всей Курило-Камчатской островной дуги указывался район от северной границы Авачинского залива до южной оконечности Камчатки. Проведенные исследования позволили установить, что подготовка Камчатского мегаземлетрясения (29.07.2025 г., $M_w = 8.8$) сопровождалась предвестниковыми аномалиями различного временного масштаба, ранее не отмеченных при подготовке менее крупных ($M_w \leq 7.7$) землетрясений в зоне Авачинского залива. К таким результатам относится следующее:

1. Регистрация в контролируемой зоне рекордных по своей продолжительности аномалий удельного электрического сопротивления (УЭС) геосреды на глубинах около 2200 и 1000 м. Формирование аномалий началось соответственно за 7 и 5 лет до момента мегаземлетрясения. В рамках консолидационной модели подготовки землетрясения И. П. Добровольского такие результаты соответствуют формированию трехмерной консолидированной жесткой неоднородности геосреды очень больших размеров.

2. Регистрация накануне мегаземлетрясения на фоне указанных продолжительных аномалий УЭС двух сильных форшоков – землетрясений Шипунское-1 (17.08.2024 г., $M_w = 7.0$) и Шипунское-2 (20.07.2025 г., $M_w = 7.4$), значительно отличающихся по характеру подготовки от ранее произошедших (с 2005 г.) в зоне Авачинского залива землетрясений с близкими магнитудами.

3. Регистрация аномальных по своему уровню изменений газонасыщенности воды скважин, сопровождавших подготовку форшоков.

Как показал анализ полученных данных, подготовка Камчатского мегаземлетрясения надежно проявилась во всем комплексе данных сети скважинных измерений в зоне Авачинского залива. Кроме этого, важные научные результаты, отражающие подготовку Камчатского мегаземлетрясения, были получены также и по данным деформационного ГНСС-мониторинга и мониторинга изменений полного электронного содержания ионосферы.

INDICATORS OF THE FINAL STAGE OF PREPARATION OF THE KAMCHATKA MEGA EARTHQUAKE JULY 29, 2025

V. A. Gavrilov*, Yu. Yu. Buss, E. V. Poltavtseva, Yu. V. Morozova, I. A. Sagaryarov

Institute of Volcanology and Seismology of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

**E-mail: vgavr1403@mail.ru*

The network of complex borehole measurements, established in the Petropavlovsk-Kamchatsky area, provides continuous monitoring of the preparation of strong earthquakes in the Avacha Bay area using seven types of borehole measurements. These include electromagnetic measurements with underground electric antennas; geoacoustic measurements at depths up to 1000 m; monitoring of changes in gas saturation and electrical conductivity of borehole water; measurements of temperature and water level of boreholes. This network was specially created to ensure continuous monitoring of the preparation of strong earthquakes in the Avacha Bay, which are dangerous for the Petropavlovsk-Kamchatsky area. The main reason for the creation of the Network in 2000 was the long-term seismic forecasts of academician S.A. Fedotov and colleagues, in which the area from the northern border of Avacha Bay to the southern tip of Kamchatka was indicated as the most likely location of the next strongest earthquake ($M \geq 7.7$) for the Kuril-Kamchatka island arc.

The conducted studies allowed us to establish that the preparation of the Kamchatka mega earthquake (07.29.2025, $M_w = 8.8$) was accompanied by precursor anomalies of various time scales that had not previously been noted during the preparation of not so strong ($M_w \leq 7.7$) earthquakes in the Avacha Bay area. These results include the following:

1. Registration anomalies of record duration in the specific electrical resistivity (SER) of the geoenvironment in the controlled zone at depths of about 2200 and 1000 m. The formation of anomalies began 7 and 5 years before the mega earthquake, respectively. Within the framework of I. P. Dobrovolsky's consolidation earthquake preparation model, such results correspond to the formation of a very large three-dimensional consolidated rigid heterogeneity of a geoenvironment.

2. Registration of two strong foreshocks on the eve of the mega earthquake against the background of these prolonged SER anomalies - earthquakes Shipunskoye-1 (08.17.2024; $M_w = 7.0$) and Shipunskoye-2 (07.20.2025, $M_w = 7.4$). These earthquakes differed significantly in the nature of their preparation from the earlier (since 2005) earthquakes with close magnitudes in the Avacha Bay area.

3. Registration of anomalous changes in the gas saturation of boreholes that accompanied the preparation of foreshocks.

As shown by the analysis of the data obtained, the preparation of the Kamchatka mega earthquake manifested itself in the entire data set of the network of complex borehole measurements in the Avacha Bay area. In addition, important scientific results reflecting the preparation of the Kamchatka mega earthquake were obtained from the results of deformation GNSS monitoring and monitoring of changes in the total electronic content of the ionosphere.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КРИПОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В ЗОНЕ СУБДУКЦИИ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ МЕХАНИКИ СИСТЕМ С НЕСМЕЖНЫМИ ФОРМАМИ РАВНОВЕСИЯ

И. А. Гарагаш*

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

**E-mail: igaragash@gmail.com*

Обычные землетрясения снимают накопленные упругие тектонические напряжения и освобождают энергию деформации, накопленную за длительный период времени, в течение секунд или минут, вызывая излучение сейсмических волн с широким спектральным составом. Противоположностью являются медленные землетрясения, которые могут продолжаться в течение дней, недель или даже месяцев. Медленные землетрясения состоят из множества мелких подвижек, посредством которых сдвиговое движение происходит квазистатически, и сейсмическая энергия излучается незначительно или вообще не излучается. Следует заметить, что поскольку сила землетрясения зависит от расстояния, на которое перемещаются горные породы в очаге и площади, где происходит это движение, многие события медленного скольжения имели бы магнитуду выше $M7$, если бы они смещались в динамическом режиме. Причину возникновения медленных землетрясений можно объяснить ползучестью среды, заполняющей зону разлома и тормозящей быстрое смещение. Предложена модель реализации медленного землетрясения в зоне субдукции. Показано, что среда с разрезом, берега которого взаимодействуют по закону сухого трения, неустойчива и ее можно характеризовать, как систему с перескоками (или с несмежными формами равновесия) аналогичную ферме Мизеса. Если добавить вязкое трение на разрезе, то развитие самоподдерживающегося процесса неустойчивости и перехода системы в новое состояние равновесия будет происходить без выделения сейсмической энергии. Ползучесть, тормозящая относительное движение берегов трещины, основана на предположении, что неровности поверхностей (асперити) погружены в вязкую среду. Уравнение движения в этом случае соответствует модели Фойгта с переменной жесткостью упругой связи, зависящей от размеров зоны разупрочнения.

MATHEMATICAL MODEL OF CREEP DISPLACEMENTS IN THE SUBDUCTION ZONE FROM THE POINT OF VIEW OF MECHANICS OF SYSTEMS WITH NON-ADJACENT FORMS OF EQUILIBRIUM

I. A. Garagash*

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

**E-mail: igaragash@gmail.com*

Conventional earthquakes release accumulated elastic tectonic stresses and release deformation energy accumulated over a long period of time, over a period of seconds or minutes, causing the emission of seismic waves with a wide spectral composition. The opposite is true for slow earthquakes that can last for days, weeks, or even months. Slow earthquakes consist of many small movements, through which the shear motion occurs quasi-statically, and seismic energy is radiated slightly or not at all. It should be noted that since the strength of an earthquake depends on the distance over which rocks move in the hearth and the area where this movement occurs, many slow-slip events would have a magnitude higher than $M7$ if they shifted dynamically. The cause of slow earthquakes can be explained by the creep of the medium filling the fault zone and inhibiting rapid displacement. A model for the implementation of a slow earthquake in the subduction zone is proposed. It is shown that a medium with a section whose shores interact according to the law of dry friction is unstable and can be characterized as a system with jumps (or with non-adjacent forms of equilibrium) similar to a Mises farm. If viscous friction is added to the section, then the development of a self-sustaining process of instability and the transition of the system to a new state of equilibrium will occur without the release of seismic energy. Creep, which slows down the relative movement of the crack banks, is based on the assumption that the surface irregularities (asperities) are immersed in a viscous medium. In this case, the equation of motion corresponds to the Voigt model with a variable elastic bond stiffness depending on the size of the softening zone

**ВОЗДЕЙСТВИЕ АНОМАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ
НА НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ
БАХА 2010 г. С $M = 7.2$ (ПО ДАННЫМ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЮЖНОЙ
КАЛИФОРНИИ)**

М. Б. Гохберг, И. А. Гарагаш*, Д. А. Алексеев, Н. А. Белов

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

**E-mail: igaragash@gmail.com*

На заключительной стадии подготовки землетрясения незадолго до основного толчка особое значение приобретают малые короткопериодные флуктуации поля напряжений и деформаций. Перспективным для целей краткосрочного прогноза является слежение за возмущениями полей напряжений и деформаций в земной коре, вызываемых взаимодействием атмосферного давления с неоднородными по механическим свойствам зонами разломов. Возможное влияние атмосферных процессов на сейсмическую активность давно обсуждается в литературе. Возмущения приземного давления в атмосферных барических образованиях (циклонах, антициклонах), по всей видимости, могут быть достаточно существенными для того, чтобы в предкритических состояниях «спровоцировать» землетрясение. Давления, создаваемые атмосферными аномалиями, проникают на большую глубину и в отличие от сейсмических возмущений действуют достаточно долго в течение нескольких дней. Изучена крупномасштабная аномалия атмосферного давления в Южной Калифорнии в январе 2010 г., которая совпала с резким развитием аномальных деформационных процессов в рамках геомеханической модели примерно за 3 месяца до катастрофического события 04.04.2010 г. С помощью трехмерной геомеханической модели Южной Калифорнии, включающей горный рельеф, разломную тектонику и основные структурные границы (кровлю нижней коры и поверхность Мохоровичича) проанализировано воздействие изменений атмосферного давления на напряжённо-деформированное состояние слоёв верхней и средней земной коры.

Показано наличие отклика на воздействие в кулоновских напряжениях. Установлено, что максимумы амплитуд кулоновских напряжений смещены относительно максимума атмосферного давления в сторону магистрального разрыва и фиксируются в непосредственной близости к эпицентру во всех слоях при максимальных амплитудах на глубинах второго и третьего слоёв, где находится гипоцентр события. Обнаружена локализация сдвиговой деформации в зоне разлома, прилегающего к эпицентру. Высказано предположение о возможном триггерном механизме воздействия изменений атмосферного давления.

**THE EFFECT OF ANOMALOUS CHANGES IN ATMOSPHERIC PRESSURE ON THE STRESS-STRAIN
STATE BEFORE THE 2010 BACH EARTHQUAKE WITH $M = 7.2$ (ACCORDING TO GEOMECHANICAL
MODELING DATA FROM SOUTHERN CALIFORNIA)**

M. B. Gokhberg, I. A. Garagash*, D. A. Alexeev, N. A. Belov

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

**E-mail: igaragash@gmail.com*

At the final stage of earthquake preparation, small short-period fluctuations in the stress and strain fields become particularly important shortly before the main shock. Monitoring of stress and strain field disturbances in the Earth's crust caused by the interaction of atmospheric pressure with fault zones with heterogeneous mechanical properties is promising for short-term forecasting purposes. The possible influence of atmospheric processes on seismic activity has long been discussed in the literature. Surface pressure disturbances in atmospheric baric formations (cyclones, anticyclones), most likely, can be significant enough to «provoke» an earthquake in precritical conditions. The pressures created by atmospheric anomalies penetrate to a great depth and, unlike seismic disturbances, act for a long time for several days. A large-scale anomaly of atmospheric

pressure in Southern California in January 2010 was studied, which coincided with a sharp development of anomalous deformation processes within the framework of the geomechanical model approximately 3 months before the catastrophic event of 04/24/2010. Using a three-dimensional geomechanical model of Southern California, which includes mountainous terrain, fault tectonics, and basic structural boundaries (the roof of the lower crust and the surface of Mohorovichich), the effects of changes in atmospheric pressure on the stress-strain state of the layers of the upper and middle crust are analyzed. The presence of a response to the effect in Coulomb stresses is shown. It is established that the maximum amplitudes of Coulomb stresses are shifted relative to the maximum atmospheric pressure towards the main rupture and are fixed in close proximity to the epicenter in all layers at maximum amplitudes at the depths of the second and third layers, where the hypocenter of the event is located. The localization of shear deformation in the fault zone adjacent to the epicenter has been detected. It is suggested that there may be a trigger mechanism for the effects of changes in atmospheric pressure.

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ЛИТОСФЕРЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ ПО ДАННЫМ ОБМЕННЫХ ВОЛН

А. Г. Гоев*

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

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

Центральная часть Восточно-Европейской платформы (ВЕП) представляет собой зону коллизии трех докембрийских протократонов – Фенноскандии, Волго-Уралии и Сарматии. Долгое время строение литосферы этого сложного тектонического узла было известно, преимущественно на основе интерполяции данных ближайших профилей ГСЗ, а также из глобальных томографических моделей. Применение современных локальных сейсмологических методов восстановления глубинного строения сдерживались отсутствием на территории достаточно разветвленной сейсмической сети.

В последние годы в рамках совместного эксперимента, проводимого ИДГ РАН и ИФЗ РАН, на территории центральной части ВЕП было установлено 9 дополнительных сейсмических станций. Они, совместно со станцией «Михнево» и оборудованием ФИЦ ЕГС РАН, создают равномерную сейсмическую сеть и впервые позволяют определить строение изучаемого региона с высокой степенью детальности.

В докладе представлены результаты применения метода функций приёмника к данным постоянных станций ФИЦ ЕГС РАН, а также нескольким станциям новой сети (работающим более трех лет). Для каждой из станций на основе совместной инверсии сейсмограмм обменных Ps и Sp волн, а также невязок времен пробега Ps волн от границ зоны фазовых переходов мантии, были построены модели строения литосферы и подстилающей верхней мантии до глубины около 300 км.

Показано, что строение литосферы существенно гетерогенно. Мощность земной коры достигает максимальных значений в центральной части коллизийной зоны. Отдельное внимание уделено особенностям среднелитосферного слоя в верхней мантии, выделяемому в моделях понижением скоростей поперечных волн на глубинах близких к 100–150 км.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012200561-3).

LITHOSPHERIC STRUCTURE OF THE CENTRAL PART OF THE EAST EUROPEAN PLATFORM FROM CONVERTED-WAVE DATA

A. G. Goev*

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

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

The central part of the East European Platform (EEP) is a collisional zone of three Precambrian protocontinents – Fennoscandia, Volgo-Uralia, and Sarmatia. For a long time, the lithospheric structure of this complex territory was known mainly from interpolation of data obtained along nearby deep seismic sounding (DSS) profiles, as well as from global tomographic models. The application of up-to-date local seismological methods for recalling deep structure was limited by the lack of a sufficiently dense seismic network in the region.

In recent years, within the framework of a joint experiment conducted by the Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics RAS and the Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, nine additional seismic stations were installed in the central part of the EEP. Together with the «Mikhnevo» station and the sensors of the Geophysical Survey RAS, they form a relatively uniform seismic network that, for the first time, makes it possible to determine the structure of the study region with appropriate resolution.

We present the results of applying the receiver function method to data from permanent stations of the Geophysical Survey RAS, as well as from several stations of the new network that have been operating for more than three years. For each station, models of the lithosphere and the underlying upper mantle down to depths of about 300 km were constructed based on joint inversion of seismograms of Ps and Sp waves, as well as travel-time residuals of Ps waves from boundaries within the mantle transition zone. The results demonstrate that the lithospheric structure is highly heterogeneous. The crust attains its maximum thickness in the central part of the collisional zone. Particular attention is paid to the characteristics of the mid-lithospheric layer in the upper mantle, identified in the models by lower shear-wave velocities at depths of approximately 100–150 km.

АЛЬФВЕНОВСКИЕ РЕЗОНАНСЫ НА БАЗЕ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ «МИХНЕВО»

Е. С. Горбовская*

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: e-gorbovskaya.98@mail.ru*

Ионосферный альфвеновский резонанс (ИАР) возникает вследствие взаимодействия грозовой активности, магнитного поля Земли и слоистой структуры ионосферы. Проявляется в виде устойчивых резонансных колебаний (0.1–10 Гц), регистрируемых индукционными магнитометрами как веерообразные полосы с дискретными частотами. Волны Альфвена обеспечивают перенос энергии в системе ионосфера-магнитосфера в диапазоне высот от 100–150 км (Е слой ионосферы) до 1000–6000 км (нижний край магнитосферы). Верхняя граница соответствует перегибу профиля альфвеновской скорости. Постоянное явление, но не всегда различимое из-за естественных электромагнитных шумов в регионе. Наиболее часто регистрируется в темное время суток, с использованием высокочувствительной аппаратуры.

Непрерывные наблюдения за изменениями геомагнитного поля в ГФО «Михнево» были использованы для статистического изучения ионосферного альфвеновского резонанса (ИАР), наблюдаемого в низкочастотном диапазоне 0.1–10.0 Гц. В данной работе были проанализированы данные, полученные за период с 2013 по 2018 гг. Были оценены частоты ИАР и времена их регистрации, построены распределения времен появления ИАР, а также их частот по годам и сезонам.

Для нескольких наиболее информативных суточных спектрограмм, соответствующих критериям максимального количества наблюдаемых дискретных полос и максимальной длительности излучения, были оценены разницы частот мод ИАР. Согласно литературе, именно эта величина характеризует концентрацию ионосферы, что позволяет использовать ее как природный инструмент для оценки электронной концентрации ионосферы. После проводилось сопоставление полученной электронной концентрации N_e с данными, рассчитанными из показаний ионозонда MO155, как пример эталонного оборудования.

Результаты исследования демонстрируют высокую степень соответствия, что подтверждает достоверность выбранного метода. При этом зафиксированные расхождения не всегда являются погрешностью — они отражают реальные особенности слоя ионосферы над территорией обсерватории и позволяют уточнить региональные параметры ионосферы.

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

ALFVÉN RESONANCES AT THE MIKHNEVO GEOPHYSICAL OBSERVATORY

E. S. Gorbovskaya*

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

** E-mail: e-gorbovskaya.98@mail.ru*

The ionospheric Alfvén resonance (IAR) arises due to the interaction of thunderstorm activity, the Earth's magnetic field, and the layered structure of the ionosphere. It manifests itself in the form of stable resonant oscillations (0.1–10 Hz), recorded by induction magnetometers as fan shaped bands with discrete frequencies. Alfvén waves provide energy transfer in the ionosphere magnetosphere system within the altitude range from 100–150 km (E layer of the ionosphere) to 1000–6000 km (lower edge of the magnetosphere). The upper boundary corresponds to the inflection point of the Alfvén speed profile.

It is a permanent phenomenon, but not always distinguishable due to natural electromagnetic noise in the region. It is most frequently recorded at night, using highly sensitive equipment.

Continuous observations of geomagnetic field variations at the Geophysical Observatory «Mikhnevo» were used for a statistical study of the ionospheric Alfvén resonance (IAR), observed in the low frequency range of 0.1–10.0 Hz. In this work, data obtained over the period from 2013 to 2018 were analysed. The IAR frequencies and their occurrence times were estimated, and distributions of IAR occurrence times, as well as their frequencies by years and seasons, were constructed.

For several of the most informative daily spectrograms meeting the criteria of the maximum number of observed discrete bands and maximum radiation duration, the frequency differences of IAR modes were estimated. According to the literature, this value characterises the ionospheric concentration, which allows it to be used as a natural tool for estimating the electron concentration of the ionosphere. Subsequently, the obtained electron concentration N_e was compared with data calculated from the readings of the ionosonde MO155, as an example of reference equipment.

The research results demonstrate a high degree of correspondence, which confirms the reliability of the chosen method. At the same time, the recorded discrepancies are not always an error – they reflect the real features of the ionospheric layer above the observatory territory and allow for refining the regional parameters of the ionosphere.

**ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ ВАРИАЦИЙ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ
ВОДОНАСЫЩЕННОГО КОЛЛЕКТОРА ПРИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВАХ (ПО ДАННЫМ
МОНИТОРИНГА НА ПОЛИГОНЕ «ГУБКИН» КМА)**

Э. М. Горбунова*, С. М. Петухова, Н. В. Кабыченко, А. В. Караваев

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: emgorbunova@bk.ru*

Территория разработки Коробковского и Лебединского железорудных месторождений Курской магнитной аномалии (КМА) относится к природно-техногенной геосистеме, так как подвержена интенсивной антропогенной нагрузке. В квазистационарных условиях вариации уровня подземных вод представляют собой индикатор объемного деформирования коллектора. Гидрогеологические отклики асинхронны вариациям атмосферного давления и используются для определения надежности изоляции водоносного горизонта от выше- и нижезалегающих слоев. Запаздывание гидрогеологического отклика на земные приливы рассматривается в качестве основного параметра для оценки водопроводимости и проницаемости водонасыщенного коллектора. Реакция подземных вод на проведение промышленных взрывов в шахте Коробковского месторождения и в карьере Лебединского месторождения регистрируется преимущественно в виде осцилляций порового давления в системе «пласт-скважина» при сейсмическом воздействии.

Наряду с косейсмическими эффектами в ряде случаев после проведения промышленных взрывов в шахте и карьере прослежены постсейсмические снижения уровня архей-протерозойского водоносного комплекса, приуроченного к надрудной толще. Среди постсейсмических эффектов могут быть выделены два вида. Первый – локальный в виде искажения приливного отклика с амплитудами от 2 до 7 мм в течение первых часов после промышленного взрыва. Второй вид представлен постепенным снижением уровня на протяжении от первых суток до 12. Максимальное снижение уровня составило 30 см в течение 6 суток на приведенном расстоянии $70 \text{ м/кг}^{-1/3}$. Подобные процессы в альб-сеноманском водоносном горизонте нижнего-верхнего мела, развитом в песчаных отложениях, не отмечено.

Механизмы постсейсмических эффектов свидетельствуют о нарушении пороупругой реакции водонасыщенного коллектора и обусловлены гидрогеодинамическими процессами, связанными с оттоком подземных вод на заполнение зон техногенной и подновленной трещиноватости. В первом случае локальное эпизодическое осложнение приливного отклика может быть вызвано скин-эффектом, а именно изменением трещиноватости обводненных пород в околоскважинном пространстве. Во втором – продолжительное снижение пьезометрической поверхности подтверждает наличие гидравлической взаимосвязи между трещинно-пластовыми и трещинно-жильными водами, получающими преимущественное развитие в пределах шахтного поля.

Необходимо отметить, что за 6-летний период наблюдений максимальные снижения уровня архей-протерозойского водоносного комплекса прослежены при проведении взрывов в камерах, расположенных ниже по направлению подземного потока относительно пунктов наблюдений. Детальный анализ графиков временного снижения уровня подземных вод позволил оценить пьезопроводность и упругую водоотдачу пласта. Полученные данные использованы для определения общего объема оттока воды на заполнение зон техногенной и подновленной трещиноватости. Прослеженное постепенное постсейсмическое снижение свидетельствует об изменении фильтрационной структуры массива.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012200570-5).

HYDROGEOLOGICAL INDICATORS OF VARIATIONS IN FILTRATION PROPERTIES OF A WATER-SATURATED RESERVOIR DURING INDUSTRIAL BLASTS (BASED ON MONITORING DATA AT THE GUBKIN TEST SITE, KMA)

E. M. Gorbunova*, S. M. Petukhova, N. V. Kabichenko, A. V. Karavaev

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

**E-mail: emgorbunova@bk.ru*

The territory of the Korobkovskoe and Lebedinskoe iron ore deposits of the Kursk Magnetic Anomaly (KMA) belongs to a natural-technogenic geosystem, as it is subject to intense anthropogenic load. Under quasi-stationary conditions, variations of underground water level serve as an indicator of volumetric deformation of the reservoir. Hydrogeological responses are asynchronous to variations in atmospheric pressure. They are used to determine the reliability of the aquifer's isolation from overlying and underlying layers. The delay of the hydrogeological response to Earth tides is considered to be the primary parameter for assessing the transmissivity and permeability of a water-saturated reservoir. Reactions of underground water to industrial blasting in the Korobkovskoe deposit mine and the Lebedinskoe deposit quarry are recorded primarily as pore pressure oscillations in the system «reservoir-well» under seismic impact.

Along with coseismic effects, in some cases after industrial blasts in the mine and quarry, post-seismic lowerings of the Archean-Proterozoic aquifer level, confined to the above-ore strata, are observed. Two types of post-seismic effects can be distinguished. The first type is local, manifesting as a distortion of the tidal response with amplitudes from 2 to 7 mm during the first hours after the industrial blast. The second type is represented by a gradual water level decrease from the first day up to 12 days. The maximum recorded level decrease was 30 cm over 6 days at a scaled distance of $70 \text{ m/kg}^{1/3}$. No such processes were observed in the Albian-Cenomanian aquifer of Lower-Upper Cretaceous, confined to sandy deposits.

The mechanisms of the recorded post-seismic effects indicate a disturbance in the poroelastic response of the water-saturated reservoir and are caused by hydrogeodynamic processes associated with groundwater outflow to fill the zones of technogenic and rejuvenated fracturing. In the first case, the local episodic complication of the tidal response may be caused by the skin effect, namely, the change in the fracturing of water-bearing rocks in the near-well space. In the second case, the prolonged lowering of the piezometric surface confirms the presence of a hydraulic connection between fracture-stratal and fracture-vein waters, which predominantly develop within the mine field.

It should be noted that over the 6-year observation period, the maximum declines in the level of the Archean-Proterozoic aquifer were observed during blasts conducted in chambers located downgradient relative to the observation points. A detailed analysis of the temporal underground water level lowering graphs allowed to estimate the piezoconductivity and elastic water loss of the aquifer. The obtained data were used to determine the total volume of water outflow required to fill the zones of technogenic and rejuvenated fracturing. The observed gradual post-seismic lowering indicates a change in the filtration structure of the massif.

АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ВУЛКАНИЧЕСКИХ РОЕВ В ПРЕДЭРУПТИВНЫЕ ФАЗЫ

Е. М. Греков*

Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: grekov.em16@physics.msu.ru*

Вулканические рои – это особый режим сейсмичности, характеризующийся большим количеством относительно слабых событий без выраженного основного толчка, происходящих за короткий промежуток времени в ограниченном пространстве. Они часто сопровождают и предвещают извержения; считается, что такой режим связан с процессами интрузий – внедрения магмы в горные породы под давлением. Однако конкретный механизм их инициации однозначно еще не определен [5, 3].

В данной работе с точки зрения сейсмического режима рассмотрен ряд вулканических роев, наблюдавшихся в предэруптивных фазах вулканов в зонах с разной природой вулканизма (субдукционная, рифтовая, «горячая точка»). Основное внимание уделено параметру наклона графика повторяемости (*b-value*), так как известно, что, в отличие от тектонической сейсмичности, для вулканических процессов наблюдается широкий спектр значений *b* (от аномально высоких – более 1.8, до аномально низких – менее 0.8) [4], однако причины этого в полной мере не ясны.

В результате анализа выделен особый тип вулканических роев. Для них характерен паттерн роста магнитуды и числа событий от начала роя к концу; при этом они завершаются сильнейшим событием в серии, а все прочие крупные события группируются во времени непосредственно перед ним. В рассмотренных случаях такие рои наблюдались в конце предэруптивной фазы, и сразу после них начиналось извержение. Также показано, что внутри этих роев значение *b* нестационарно во времени: оно меняется от аномально высокого в начале (более 1.8) к «классическому» (около 1) либо умеренно повышенному (около 1.5) в конце.

Такое поведение характерно для переходных режимов сейсмичности в целом [1] и соответствует модели эволюции разрушения от малых масштабов к более крупным. В случае интрузии такой переход может описываться моделью Хилла [2], рассматривающей возникновение вулканических роев как разрушение перемычек в эшелоне даек. В таком случае аномально высокие значения *b* связаны с начальной фазой роев выделенного типа, когда происходит множественное разрушение мелких перемычек. Также показано, что такой тип роев не наблюдается при интрузиях в зонах тектонического растяжения – там, где внедрение магмы, вероятно, происходит по уже раскрытым трещинам при меньшем сопротивлении горных пород.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда
(проект № 25-17-00094).*

Литература

1. Смирнов В.Б., Пономарев А.В. Физика переходных режимов сейсмичности. М. : РАН. 2020. – 412 с. ISBN 978-5-907036-90-1
2. Hill D.P. A model for earthquake swarms // Journal of Geophysical Research. 1977. Vol. 82. P. 1347–1352.
3. Keir D., De Siena L., Doubre C., Johnson J.H., Maccaferri F., Passarelli L. Editorial: Seismicity in Volcanic Areas // Front. Earth Sci. 2021. Vol. 9. P. 829460. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.829460>
4. Roberts N.S., Bell A.F., Main I.G. Are volcanic seismic b-values high, and if so when? // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2015. Vol. 308. P. 127–141. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.10.021>.
5. Roman D.C., Cashman K.V. The origin of volcano-tectonic earthquake swarms // Geology. 2006. Vol. 34 (6). P. 457–460. <https://doi.org/10.1130/G22269.1>

ANALYSIS OF THE SEISMIC REGIME OF VOLCANIC SWARMS IN PRE-ERUPTIVE PHASES

E. M. Grekov*

Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of Russian academy of sciences, Moscow, Russia

**E-mail: grekov.em16@physics.msu.ru*

Volcanic swarms represent a distinct seismic regime characterized by a large number of relatively weak events without a clear mainshock, occurring over a short period within a confined space. They often accompany and precede eruptions; it is generally accepted that this regime is associated with intrusive processes – the injection of magma into host rocks under pressure. However, the specific mechanism of their initiation has not yet been clearly determined.

This study examines the seismic regimes of a number of volcanic swarms observed during the pre-eruptive phases of volcanoes with different nature of volcanism (subduction, rift, and hotspot). Particular attention is paid to the *b-value* – the slope of the frequency-magnitude distribution, as it is known that, unlike tectonic seismicity, volcanic processes exhibit a wide range of *b-values* (from anomalously high, > 1.8 , to anomalously low, < 0.8). However, the reasons for this variability are not yet fully understood.

Our analysis identifies a specific type of volcanic swarm characterized by a pattern of increasing magnitude and event rate from the onset to the end of the sequence. These swarms end with the largest event, while other major events are clustered in time immediately prior to it. In the cases studied, such swarms occurred at the end of the pre-eruptive phase and were immediately followed by an eruption. It is also shown that the *b-value* within these swarms is non-stationary: it evolves from anomalously high values at the beginning (> 1.8) to «classical» (around 1) or moderately elevated (~ 1.5) values toward the end.

Such behavior is typical of transitional seismic regimes in general and is consistent with the model of fracture evolution from small to larger scales. In the case of intrusion, this transition can be described by Hill's model, which attributes the initiation of volcanic swarms to the failure of bridges within an en-echelon dike system. In this context, anomalously high *b-values* are associated with the initial phase of such swarms, when numerous small bridges fail. Furthermore, it is shown that this type of swarm is not observed during intrusions in tectonic extension zones – where magma injection likely occurs along pre-existing open fractures with lower host-rock resistance.

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТРИГГЕРНЫХ СОБЫТИЙ И АФТЕРШОКОВЫХ СЕРИЙ ПРИ
СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ УДАРООПАСНОСТИ ГОРНОГО МАССИВА
ПО ДАННЫМ СИСТЕМЫ «PROGNOZ-ADS»**

А. П. Грунин*, А. В. Сидляр

Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, Хабаровск, Россия

**E-mail: lexx188@mail.ru*

В условиях ведения горных работ на удароопасных месторождениях важной задачей геофизического контроля является своевременное обнаружение процессов перераспределения напряжений в массиве горных пород. Такие процессы часто проявляются в виде триггерных событий, инициирующих последующие афтершоковые последовательности. Автоматизированная система контроля горного давления «Prognoz-ADS», применяемая на ряде удароопасных месторождений России, предназначена для непрерывной регистрации в массиве горных пород событий акустической эмиссии (являющихся следствием разрушения горных пород) в частотном диапазоне 0.2–12 кГц. Экспертный анализ данных системы, собранных за время ее эксплуатации, позволил выявить основные закономерности триггерно-афтершоковых серий, что дало возможность разработать алгоритм их автоматической идентификации.

Основа работы базируется на представлениях сейсмологии, согласно которым афтершоки возникают вследствие перераспределения напряжений после главного толчка (триггера), а их затухание во времени подчиняется закону Омори–Уцу. В рамках исследования были проанализированы современные подходы к описанию афтершоковых последовательностей, включая модели ETAS, LPL и PLE. На основе проведенного анализа был выбран метод идентификации триггер-афтершоковых серий, базирующийся на анализе энергетических и временных параметров реальных данных.

Для разработки методики и создания алгоритма автоматической идентификации были использованы 47, определенных экспертами, групп «триггер-афтершоки», зарегистрированных системой за период с 2011 по 2023 гг. В ходе статистического анализа этих групп определены ключевые параметры алгоритма. Для проверки его эффективности установлен минимальный порог энергии триггерного события, составляющий 5000 Дж. Минимальное число афтершоков в группе, позволяющее классифицировать событие как триггер, принято равным пяти. Анализ времени регистрации событий показал, что первое афтершоковое событие в 90% случаев происходит в течение 5 минут после триггера, а максимальный интервал между последующими событиями в группе не превышает 140 минут.

Алгоритм идентификации реализован на языке Python и протестирован на базе данных системы «Prognoz-ADS» Николаевского месторождения за период 2011–2024 гг. Качество работы алгоритма оценивалось по 47, выявленным экспертами, последовательностям. Из 47 триггерных серий алгоритм корректно идентифицировал 40, что соответствует 85% точности обнаружения. Случаи, когда алгоритм не обнаружил последовательности, представляют собой сложные сценарии, в которых предполагаемые триггеры попали в афтершоковые серии предшествовавших более мощных событий.

Одним из этапов верификации, позволяющим удостовериться, что найденная серия событий является именно триггерно-афтершоковой, а не интенсивным потоком фоновых событий, стала проверка выделенных длинных последовательностей (с числом афтершоков 10 и более) на соответствие закону затухания Омори–Уцу. Из 24 проанализированных групп с указанным количеством событий для 18 была получена сходимость модели с коэффициентами детерминации (R^2) в диапазоне от 0.605 до 0.969. Это подтверждает, что выделенные алгоритмом группы в большинстве случаев отражают реальные физические процессы релаксации напряжений, а не случайную фоновую активность.

Разработанный алгоритм позволяет повысить оперативность и объективность анализа геодинамического состояния массива на Николаевском месторождении. Его применение дает возможность более детально оценивать акустическую активность и разрабатывать прогнозные критерии. Дальнейшие исследования будут направлены на повышение точности идентификации и интеграцию алгоритма в систему оперативного прогноза удароопасности.

IDENTIFICATION OF TRIGGER EVENTS AND AFTERSHOCK SEQUENCES DURING SEISMOACOUSTIC MONITORING OF ROCK BURST HAZARD BASED ON DATA FROM THE «PROGNOZ-ADS» SYSTEM

A. P. Grunin*, A. V. Sidlyar

Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

**E-mail: lexx188@mail.ru*

In the context of mining operations at rock burst-hazardous deposits, a key objective of geophysical monitoring is the timely detection of stress redistribution processes within the rock mass. Such processes often manifest as trigger events that initiate subsequent aftershock sequences. The automated rock pressure monitoring system «Prognoz-ADS», deployed at several rock burst-hazardous deposits in Russia, is designed for the continuous recording of acoustic emission events in the rock mass within the frequency range of 0.2–12 kHz. Expert analysis of the data collected by the system over its operational period has revealed the primary patterns of trigger-aftershock series, enabling the development of an algorithm for their automatic identification.

The work is grounded in the concepts of seismology, according to which aftershocks arise from the redistribution of stresses following a main shock, and their decay over time follows the Omori-Utsu law. The study analyzed modern approaches to describing aftershock sequences, including the ETAS, LPL, and PLE models. Based on this analysis, a method for identifying «trigger-aftershock» series was selected, relying on the analysis of energy and temporal parameters.

To develop and create the automatic identification algorithm, 47 expert-identified «trigger-aftershock» groups, recorded by the system between 2011 and 2023, were utilized. Statistical analysis of these groups determined the key parameters for the algorithm. To verify its effectiveness, a minimum energy threshold for the trigger event was set at 5000 J. The minimum number of aftershocks in a group required to classify an event as a trigger was established at five. Analysis of event registration times showed that in 90% of cases, the first aftershock event occurs within 5 minutes of the trigger, and the maximum interval between subsequent events within the group does not exceed 140 minutes.

The identification algorithm was implemented in Python and tested using the «Prognoz-ADS» database from the Nikolaevskoye deposit for the period 2011–2024. The algorithm's performance was evaluated against the 47 expert-identified sequences. Out of 47 trigger series, the algorithm correctly identified 40, corresponding to an 85% detection accuracy rate. Cases where the algorithm failed to detect sequences represent complex scenarios where the potential triggers fell within the aftershock series of preceding, more powerful events.

Verification involved checking long sequences (≥ 10 aftershocks) for Omori–Utsu law compliance. Of the 24 analyzed groups meeting this event count criterion, 18 showed model convergence with coefficient of determination (R^2) ranging from 0.605 to 0.969. This confirms that, in most cases, the groups identified by the algorithm reflect real physical processes of stress relaxation rather than random background activity.

The developed algorithm enhances the efficiency and objectivity of analyzing the geodynamic state of the rock mass at the Nikolaevskoye deposit. Its application enables a more detailed assessment of acoustic activity and the development of predictive criteria. Future research will focus on improving identification accuracy and integrating the algorithm into the operational rock burst hazard forecasting system.

КЛАССИФИКАЦИЯ ТРИГГЕРОВ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГЕОСФЕРАХ

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

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

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

Работа посвящена систематизации исключительно богатого многообразия триггеров динамических процессов в геофизических средах. Предложена простая в употреблении система деления триггеров, по-видимому, пригодная для любой геосферы. Введено три основных категории: тип, класс и вид. Классификация дихотомическая, т.е. каждый из двух типов содержит два класса, и каждый класс содержит два вида. Введена общепонятная номенклатура. На каждом уровне классифицирования указан один единственный признак деления. Таким образом, имеется 8 видов, 4 класса и 2 типа триггеров. Классификация может быть детализирована. Например, каждый вид триггеров землетрясений может быть разделен на четыре разновидности – механический, электромагнитный, тепловой или химический триггер. Предложенная система продемонстрирована на примерах из динамики литосферы (триггеры землетрясений) и магнитосферы (триггеры УНЧ волн). Представлены эндогенные механические триггеры афтершоков. Рассмотрен сложный вопрос о форшоках как о каскаде триггеров главного удара землетрясения. Особое внимание уделено искусственным экзогенным периодическим триггерам, свидетельствующим о воздействии техносферы на динамические процессы в магнитосфере. Отмечено, что разделение множества триггеров в геосферах на упорядоченную совокупность хорошо отождествляемых подмножеств может иметь эвристическое значение. Предложено создать рабочую группу для усовершенствования классификации триггеров и выработки предложений по номенклатуре, которая могла бы быть утверждена на очередной конференции по триггерным эффектам в геосферах.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Института физики Земли имени О. Ю. Шмидта РАН

CLASSIFICATION OF TRIGGERS OF DYNAMIC PROCESSES IN GEOSPHERES

A. V. Guglielmi*, A. D. Zavyalov, O. D. Zotov

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

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

This work is devoted to systematizing the exceptionally rich diversity of triggers for dynamic processes in geophysical environments. A simple-to-use trigger classification system is proposed, apparently suitable for any geosphere. Three main categories are introduced: type, class, and species. The classification is dichotomic, i.e., each of the two types contains two classes, and each class contains two species. A generally understandable nomenclature is introduced. At each classification level, a single division feature is indicated. Thus, there are 8 species, 4 classes, and 2 types of triggers. The classification can be detailed. For example, each species of earthquake trigger can be divided into four varieties: mechanical, electromagnetic, thermal, or chemical triggers. The proposed system is demonstrated using examples from the dynamics of the lithosphere (earthquake triggers) and the magnetosphere (ULF wave triggers). Endogenous mechanical triggers of aftershocks are presented. The complex issue of foreshocks as a cascade of earthquake mainshock triggers is considered. Particular attention is given to artificial exogenous periodic triggers, indicating the impact of the technosphere on dynamic processes in the magnetosphere. It is noted that dividing the set of triggers in the geosphere into an ordered set of easily identifiable subsets may have heuristic value. It is proposed to create a working group to refine the classification of triggers and develop proposals for a nomenclature that could be approved at the next conference on trigger effects in the geosphere.

ТРИ ВИДА ТРИГГЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ ИЗ РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ

А. В. Гульельми^{1,*}, А. С. Потапов², Ф. З. Фейгин¹, Б. В. Довбня³, О. Д. Зотов^{1,3}

¹Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

²Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

³Геофизическая обсерватория «Борок» Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, пос. Борок, Ярославская обл., Россия

*E-mail: guglielmi@mail.ru

На поверхность Земли из космического пространства падают ультранизкочастотные электромагнитные волны в диапазоне Pc1 (0.2–5 Гц), названные Саксдорфом (1936 г.) ожерельем жемчуга. Жемчужины возбуждаются в виде дискретных волновых пакетов в результате автоколебаний внешнего радиационного пояса. Из 8 видов триггеров, существующих в геосферах, 3 вида воздействуют на режим возбуждения жемчужин: естественный эндогенный аperiodический, естественный экзогенный аperiodический, и искусственный экзогенный периодический триггер. В докладе дано описание генератора периодичной последовательности дискретных пакетов электромагнитных волн. Генератор располагается высоко над Землей в узкой экваториальной зоне и представляет собой открытый проточный ионно-циклотронный резонатор (ИЦР) с активным заполнением в виде малой примеси энергичных протонов. Предложен оригинальный механизм пондеромоторной модуляции добротности ИЦР. В результате действия механизма резонатор периодически переходит из режима высокой в режим низкой добротности и обратно, излучая дискретные сигналы, которые на земной поверхности регистрируются в виде серий жемчужин. В режиме высокой добротности пондеромоторная сила нарастает экспоненциально и создает пониженное парциальное давление тяжелых ионов у торцов резонатора. Возникает перепад давления, который приводит к перетеканию тяжелых ионов из полосы непрозрачности внутрь резонатора.

Ширина полосы уменьшается, добротность резонатора падает, накопленная волновая энергия проникает через полосу и переносится к Земле в виде дискретного волнового пакета. Пересекая наружную границу полосы, волновой пакет создает импульс силы, направленный внутрь полосы. В результате тяжелые ионы извне проникают в полосу, ширина полосы увеличивается, добротность резонатора восстанавливается, после чего процесс повторяется вновь и вновь. Указаны естественные триггеры, воздействующие на ИЦР: инжекция частиц, межпланетная ударная волна, землетрясение. Отдельно рассмотрен искусственный триггер неизвестного происхождения, вызывающий так называемый Биг-Бен эффект.

THREE TYPES OF TRIGGERING EFFECTS ON A PULSE SIGNAL GENERATOR FROM THE EARTH'S RADIATION BELT

A. V. Guglielmi^{1,*}, A. S. Potapov², F. Z. Feygin¹, B. V. Dovbnya³, O. D. Zotov^{1,3}

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

²Institute of Solar-Terrestrial Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Irkutsk, Russia

³Borok Geophysical Observatory of the Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Borok, Yaroslavl region, Russia

*E-mail: guglielmi@mail.ru

Ultra-low-frequency electromagnetic waves in the Pc1 range (0.2–5 Hz), called «pearl necklaces» by E. Sucksdorff (1936), fall from outer space onto the Earth's surface. Pearls are excited as discrete wave packets by self-oscillations of the outer radiation belt. Of the eight types of triggers existing in the geosphere, three influence the pearl excitation regime: a natural endogenous aperiodic trigger, a natural exogenous aperiodic trigger, and an artificial exogenous periodic trigger. The report describes a generator of a periodic sequence of

discrete electromagnetic wave packets. The generator is located high above the Earth in a narrow equatorial zone and is an open-flow ion cyclotron resonator (ICR) with an active filling of a small admixture of energetic protons. A unique mechanism for ponderomotive Q-modulation of the ICR is proposed. As a result of the mechanism operation, the resonator periodically switches from high-Q to low-Q mode and back, emitting discrete signals that are recorded on the Earth's surface as a series of pearls. In high-Q mode, the ponderomotive force increases exponentially, creating a reduced partial pressure of heavy ions at the resonator's ends. This causes a pressure differential that forces heavy ions to flow from the opaque band into the resonator

The band width decreases, Q factor of the resonator drops, and the accumulated wave energy penetrates the band and is transferred to Earth as a discrete wave packet. Crossing the outer boundary of the band, the wave packet creates a force pulse directed inward. As a result, heavy ions from outside penetrate the band, the band width increases, the resonator Q factor is restored, and the process repeats over and over again. Natural triggers affecting the ICR are indicated: particle injection, interplanetary shock wave, and earthquake. An artificial trigger of unknown origin, causing the so-called Big Ben effect, is separately considered

ЭФФЕКТИВНЫЙ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНЫЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР: КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

С. А. Гуляков*, Л. М. Богомолов, Н. С. Стовбун, И. П. Дудченко

Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, Южно-Сахалинск, Россия

E-mail: gulyakov_97@mail.ru

Настоящая работа продолжает цикл исследований триггерной сейсмичности на о. Сахалин (2018–2022 гг.), инициируемой наведённым электрическим полем в упруго-деформируемой среде с использованием контролируемого электроимпульсного геофизического генератора. В качестве индикатора результативного электровоздействия служит получение устойчивого отклика в сейсмическом или акустическом поле регистрирующей аппаратуры на экспериментальной площадке. Опираясь на накопленный опыт, авторами была предпринята попытка пересмотра концепции мощностных и периферийных возможностей генерирующего устройства. Учитывая, что установка ЭРГУ-600-2 (400 В, 600 А) на Научной станции РАН в г. Бишкек до сих пор активно эксплуатируется, в качестве базовых параметров для проектируемой энергетической установки малой мощности приняты номинальные значения напряжения 400 В.

Повышение энерговыклада в геосреду при сохранении экономической эффективности обеспечено за счёт сборки аккумуляторной батареи на основе свинцово-кислотных AGM-аккумуляторов. Батарея предназначена для работы в режиме накопления повторяющихся однополярных импульсов (скважность 1:1, общее количество импульсов – 100, длительность импульса и пауза – по 10 с). Регулирование выходной мощности осуществляется путём подключения необходимого количества аккумуляторов в параллель. Согласно расчётам, с учётом КПД аккумуляторов и коэффициента запаса 10%, для достижения требуемых параметров достаточно 102 аккумуляторные батареи типа DEXP Power-EG 1272 (12 В, 9 Ач). С учетом этого сформировано три параллельные группы по 34 элемента в каждой. Общий вес аккумуляторной сборки составил более 220 кг.

Вместе с тем новое коммутирующее устройство получило функцию автоматического протоколирования сеансов зондирования с присвоением временных меток и порядковых номеров импульсов, с последующей записью данных на внешний носитель — microSD-карту. Главным же усовершенствованием стало изменение ключевого элемента: вместо одиночного IGBT-транзистора на 20 А установлен IGBT-модуль, обеспечивающий коммутацию тока до 60 А при напряжении 400 В.

Ожидается, что достигнутые параметры источника позволят создать плотность тока вблизи разломных зон о. Сахалин (порядка $5 \cdot 10^{-6}$ А/м²) для регистрации триггерных сейсмических и акустических откликов в ближней зоне (до 150 м).

EFFICIENT ELECTRIC PULSE GEOPHYSICAL GENERATOR: DESIGN SOLUTIONS AND TECHNICAL CHARACTERISTICS

S. A. Gulyakov*, L. M. Bogomolov, N. S. Stovbun, I. P. Dudchenko

Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

**E-mail: gulyakov_97@mail.ru*

This study continues the cycle of research on triggered seismicity on Sakhalin Island (2018–2022), induced by an artificial electric field in an elastically deformable medium using a controlled electro-impulse geophysical generator. The indicator of an effective electrical impact session is the recording of a stable response in the seismic or acoustic field by the monitoring equipment at the experimental site. Drawing on accumulated experience, the authors undertook a revision of the concept regarding the power and peripheral capabilities of the generating device. Considering that the ERGU-600-2 installation (400 V, 600 A) at the RAS Scientific

Station in Bishkek continues to be actively operated, the nominal voltage value of 400 V was adopted as the basic parameter for the designed low-power energy unit.

The increase in energy input into the geological medium while maintaining economic efficiency is achieved through the assembly of a battery pack based on lead-acid AGM accumulators. The battery is designed to operate in the mode of accumulating repeated unipolar pulses (duty cycle 1:1, total of 100 pulses, pulse duration and pause – 10 s each). Output power is regulated by connecting the required number of accumulators in parallel. According to calculations, taking into account the efficiency of the accumulators and a 10 % safety margin, 102 DEXP Power-EG 1272 batteries (12 V, 9 Ah) are sufficient to achieve the required parameters. Taking this into account, three parallel groups of 34 cells each were formed. The total weight of the accumulator assembly exceeded 220 kg.

In addition, the new switching device has acquired the function of automatic session logging with the assignment of time stamps and sequential pulse numbers, followed by data recording on an external microSD card. The main improvement was the modification of the key element: instead of a single 20 A IGBT transistor, an IGBT module capable of switching currents up to 60 A at 400 V was installed.

It is expected that the achieved source parameters will create a current density of about $5 \cdot 10^{-6} \text{ A/m}^2$ near the fault zones of Sakhalin Island, sufficient for the registration of triggered seismic and acoustic responses in the near zone (up to 150 m).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ В ОБЛАСТИ, ОБЛАДАЮЩЕЙ СВОЙСТВАМИ ЗОНЫ СУБДУКЦИИ

Е. Е. Дамаскинская*, В. Л. Гиляров

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

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

Предложена компьютерная модель, позволяющая исследовать разрушение гетерогенного материала (в том числе, горных пород) со сложной иерархической структурой. Модель основана на методе дискретных элементов (*discrete element method*, DEM) [1], который наиболее адекватен для моделирования разрушения гетерогенных материалов. В работе была использована модель связанных частиц (*bonded particle model*, BPM) [2], различные модификации которой широко применяются для изучения поведения материалов при механическом разрушении. Материал представляется как совокупность сферических частиц (моделирующих зерна поликристалла), соединенных связями (моделирующими межзеренные границы) в местах контактов частиц. В модели BPM зарождение трещин определяется разрывом связей между частицами, а распространение – слиянием множества разорванных связей [2].

Для моделирования сложной иерархической структуры, в том числе, подобной зоне субдукции, была модифицирована открытая платформа MUSEN [3]. В результате, появилась возможность учитывать сложную геометрию интерфейса плит, неоднородность минерального состава и вариации механических свойств, а также включения с повышенной прочностью (*asperity*).

Модель воспроизводит процесс одноосного сжатия цилиндрических образцов, сформированных из сферических частиц различных фракций (кварц, ортоклаз, олигоклаз), соединенных упругими связями (частицы из одинаковых материалов соединялись связью из этого же материала, а частицы из разных материалов соединялись связями, имеющими значительно более низкий модуль и пределы прочности). Внутри образца находится область, имитирующая зону субдукции. Показано, что наличие «зоны субдукции» в образце приводит к значительному уменьшению прочности и долговечности образца.

В симуляциях выявлена последовательность разрушения структурных элементов: сначала происходит дестабилизация низкопрочной прослойки, имитирующей границу (зону трения) между плитами, за которой следует постепенное каскадное разрушение высокопрочных включений (*asperity*). На этом этапе разрушение имеет локализованный характер, связанный с разрушением включений. Фрактальная размерность данных локальных очагов разрушения ~ 2 . Затем наблюдается дисперсное разрушение во всем объеме образца. Дальнейшее увеличение напряжения приводит к образованию очага разрушения (вне области *asperity*), рост которого захватывает все больший объем, что сопровождается увеличением фрактальной размерности.

Был проведен анализ максимальных локальных растягивающих напряжений и деформаций. Установлено, что энтропия Шеннона, рассчитанная по распределениям этих параметров, при разрушении *asperity* сохраняет примерно постоянное значение. В то время как изменение энтропии Шеннона при разрушении остальных фракций материала подобно изменению напряжения на образце. Этот факт подтверждает особую роль включений в процессе разрушения.

Литература

1. Lisjak A., Grasselli G. A review of discrete modeling techniques for fracturing processes in discontinuous rock masses // J. of Rock Mech. and Geotechnical Engineering. 2014. Vol. 6 (4). P. 301–314.
2. Potyondy D.O., Cundall P.A. A bonded-particle model for rock // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2004. Vol. 41 (8). P. 1329–1364.
3. Dosta M., Skorych V. MUSEN: An open-source framework for GPU-accelerated DEM simulations // Software X12. 2020. P. 100618.

MODELING THE FRACTURE PROCESS IN A REGION WITH PROPERTIES OF A SUBDUCTION ZONE

E. E. Damaskinskaya*, V. L. Gilyarov

Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

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

A computer model is proposed for studying the fracture of heterogeneous materials (including rocks) with a complex hierarchical structure. The model is based on the DEM (discrete element method), which is most adequate for simulating the fracture of heterogeneous materials. A BPM (bonded particle model) was used in this study; various modifications of this model are widely used to study the behavior of materials under mechanical fracture. The material is represented as a set of spherical particles (simulating polycrystalline grains) connected by bonds (simulating grain boundaries) at the points of particle contact. In the BPM model, crack initiation is determined by the rupture of bonds between particles, and crack propagation is determined by the merging of multiple broken bonds.

To model complex hierarchical structures, including those similar to a subduction zone, the open-source MUSEN platform was modified. This made it possible to account for complex plate interface geometry, heterogeneity of mineral composition, variations in mechanical properties, and inclusions with increased strength (*asperity*).

The model simulates the uniaxial compression of cylindrical samples formed from spherical particles of various fractions (quartz, orthoclase, oligoclase) connected by elastic bonds (particles made of the same materials were connected by a bond made of the same material, while particles of different materials were connected by bonds with significantly lower modulus and ultimate strength). Within the sample is a region simulating a subduction zone. It was shown that the presence of a «subduction zone» in the sample leads to a significant reduction in strength and durability.

The simulations revealed a sequence of failure of structural elements: first, destabilization of the low-strength interlayer simulating the boundary (friction zone) between the plates occurs, followed by gradual cascading failure of high-strength inclusions (*asperity*). At this stage, failure is localized, associated with the failure of the inclusions. The fractal dimension of these local failure foci is ~ 2 . Dispersed failure is then observed throughout the entire volume of the sample. A further increase in stress leads to the formation of a failure foci (outside the *asperity* region), whose growth encompasses an increasingly larger volume, accompanied by an increase in fractal dimension.

An analysis of the maximum local tensile stresses and strains was conducted. It was found that the Shannon entropy, calculated from the distributions of these parameters, remains approximately constant during *asperity* failure. While the change in Shannon entropy during fracture of the remaining fractions of the material is similar to the change in stress on the specimen, this fact confirms the special role of inclusions in the fracture process.

ИЗУЧЕНИЕ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССА САМОВОЗГОРАНИЯ УГЛЯ НА ОСНОВЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ КАМЕННЫХ УГЛЕЙ

А. И. Докучаева*, О. Н. Малинникова

Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: ana-anastasia2015@yandex.ru*

Эндогенные пожары, вызванные самопроизвольным возгоранием угля, весьма сложно поддаются ликвидации. Устранить эндогенный пожар на этапе своевременного обнаружения очага самовозгорания легче, чем уже действующий. Поскольку самовозгорание – сложный процесс, на развитие которого влияют множество факторов, установление закономерностей самовозгорания угля на молекулярном уровне поможет решить проблему прогноза эндогенных пожаров.

Кинетика процессов, происходящих в угле при повышении температуры, была изучена нами методом термогравиметрического анализа (ТГА). Такой подход позволил получить представление о закономерностях преобразования угля на разных стадиях термодеструкции – от испарения влаги до сгорания. Было установлено, что чем больше содержание влаги в угле, тем выше скорость и величина термодеструкционных процессов в диапазоне температур 25°–200° С, однако зависимость между содержанием влаги в угле и температурой начала реакции окисления не выявлена. При температурах 100°–300° С для склонных к самовозгоранию углей были получены более высокие скорости прироста массы, характеризующие интенсивность протекания реакции окисления. В интервале 300°–900° С зависимости между скоростью термического разложения и склонностью углей к самовозгоранию не зафиксировано.

С помощью рентгенографических исследований было показано, что угли, склонные к самовозгоранию, характеризуются менее упорядоченной микроструктурой (K_{γ} от 0.69 до 0.78), чем не склонные (K_{γ} от 0.25 до 0.30). Следовательно, склонные к самовозгоранию угли содержат больше алифатической составляющей и обладают более длинными разветвленными боковыми цепями. При нагревании угля до 900° С установленные различия исчезают, так как именно длинные боковые алифатические цепи содержат влагу и другие летучие вещества, легко распадающиеся при нагревании.

STUDY OF THE DEVELOPMENT OF COAL SPONTANEOUS COMBUSTION BASED ON THE LAWS OF THERMAL DECOMPOSITION OF COAL

A. I. Dokuchaeva*, O. N. Malinnikova

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

**E-mail: ana-anastasia2015@yandex.ru*

Underground fires caused by spontaneous coal combustion are very difficult to extinguish. It is easier to eliminate an underground fire at the stage of timely detection of a self-ignition source than to eliminate an already active fire. Since spontaneous combustion is a complex process influenced by many factors, establishing the patterns of spontaneous coal combustion at the molecular level will help solve the problem of predicting underground fires.

The kinetics of the processes occurring in coal at increasing temperatures was studied by us using the thermogravimetric analysis (TGA). This approach allowed us to obtain an idea of the patterns of coal transformation at different stages of thermodecomposition – from moisture evaporation to combustion. It was found that the higher the moisture content in coal, the higher the rate and magnitude of thermodecomposition processes in the temperature range of 25°–200° C, however, the dependence between the moisture content in coal and the temperature of the beginning of the oxidation reaction was not revealed. At temperatures of 100°–300° C, higher mass growth rates were obtained for self-igniting coals, which characterize the

intensity of the oxidation reaction. In the range of 300°–900° C, no correlation was observed between the rate of thermal decomposition and the self-ignition tendency of coals.

X-ray diffraction studies have shown that self-igniting coals have a less ordered microstructure ($K\gamma$ ranging from 0.69 to 0.78) than non-self-igniting coals ($K\gamma$ ranging from 0.25 to 0.30). Therefore, self-igniting coals contain more aliphatic components and have longer, more branched side chains. When coal is heated to 900° C, the established differences disappear, as it is the long side aliphatic chains that contain moisture and other volatile substances that easily break down when heated.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕТЕПЛОВОГО ГЕКТОМЕТРОВОГО КОНТИНУУМ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ СЕМИ ЛЕТ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Д. А. Дорофеев^{1,2,*}, А. А. Чернышов¹, Д. В. Чугунин¹, М. М. Могилевский¹

¹Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

*E-mail: dorofeev.d@hse.ru

Нетепловой гектометровый континуум (ГМК) – высокочастотное радиоизлучение на частотах 600–1700 кГц, которое было впервые зарегистрировано на японском спутнике ERG (Arase), запущенном 20 декабря 2016 г. Нами была проанализирована статистика наблюдений ГМК за период более чем 7 лет (2017–2024 гг.), что позволило уменьшить влияние прецессирующей орбиты спутника ERG (Arase) и выявить характерные особенности ГМК на разных временных масштабах. Благодаря данному анализу, были установлены новые и подтверждены ранее известные свойства данного типа излучения.

Данный тип излучения наблюдается преимущественно в ночные и предрассветные часы в верхней ионосфере вблизи магнитного экватора на расстояниях порядка $(1.1-2)R_E$ (R_E – радиус Земли) и на $< 1.5L$ (L – параметр Мак-Илвайна). Это связано с тем, что процессы ионизации в ионосфере Земли играют ключевую роль в механизме генерации ГМК, из-за чего также возникает смещение генерации на 1–3 часа относительно рассвета и заката.

Показано, что форма спектра ГМК определяется геометрией пересечения орбиты спутника с лучом излучения. Преобладание случаев ГМК наблюдалось в летние месяцы (с мая по сентябрь), а наименьшее количество случаев приходилось на осеннее и весеннее равноденствия. Была обнаружена антикорреляция ГМК с солнечной активностью (после середины 2022 г. регистрация прекратилась), что может быть связано с приближением Солнца к максимуму 25-го цикла и уменьшением потоков высокоэнергичных частиц, участвующих в генерации ГМК. С другой стороны, зависимость от геомагнитной активности отсутствует, в отличие от других типов магнитосферных излучений (авроральное километровое радиоизлучение и нетепловой километровый континуум).

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда
(проект № 25-12-00059).*

STATISTICAL PROPERTIES OF NON-THERMAL HECTOMETRIC CONTINUUM EMISSION BASED ON SEVEN YEARS OF SATELLITE OBSERVATIONS

D. A. Dorofeev^{1,2,*}, A. A. Chernyshov¹, D. V. Chugunin¹, M. M. Mogilevsky¹

¹Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

*E-mail: dorofeev.d@hse.ru

Non-thermal Hectometric Continuum (HMC) – high-frequency radio emission in the 600–1700 kHz range, first recorded by the Japanese satellite ERG (Arase), launched on December 20, 2016. We analyzed observation statistics of the HMC over a period of more than 7 years (2017–2024), which made it possible to reduce the influence of the precessing orbit of the ERG (Arase) satellite and to identify the characteristic features of the HMC on different time scales.

This analysis allowed us to establish new properties and confirm previously known ones for this type of emission. This type of emission is observed primarily during nighttime and pre-dawn hours in the upper ionosphere near the magnetic equator at distances of about $(1.1-2)R_E$ (R_E is the Earth's radius) and at $L < 1.5$ (L is the McIlwain parameter). This is due to the fact that ionization processes in the Earth's ionosphere play a key role in the generation mechanism of the HMC, which also causes a shift in generation by 1–3 hours relative to dawn and dusk.

It is shown that the shape of the HMC spectrum is determined by the geometry of the intersection of the satellite's orbit with the emission beam. Predominance of HMC events was observed during the summer months (May to September), while the fewest events occurred during the autumn and spring equinoxes. An anticorrelation of the HMC with solar activity was found (registration ceased after mid-2022), which may be due to the Sun approaching the maximum of the 25th cycle and a decrease in the fluxes of high-energy particles involved in the generation of the HMC. On the other hand, in contrast to other types of magnetospheric emissions (auroral kilometric radiation and non-thermal kilometric continuum), there is no dependence on geomagnetic activity.

МОДЕЛЬ ФРАГМЕНТАЦИИ МЕЛКИХ МЕТЕОРНЫХ ТЕЛ

В. В. Ефремов*

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: vve1994@gmail.com*

Основной метод получения характеристик мелких метеорных тел (< 1 см) — анализ их взаимодействия с атмосферой. Задача точного определения параметров метеороидов, включая массу, плотность и другие характеристики, остаётся актуальной. Масса метеороидов обычно оценивается с помощью различных моделей абляции или по эмпирическим зависимостям; данные наблюдений служат опорой для калибровки и проверки этих оценок. Разброс оценок массы для одного и того же метеора может превышать порядок величины, что обусловлено множеством факторов, включая вариации начальных условий, состав вещества и геометрию входа в атмосферу. Большинство мелких метеороидов испытывают фрагментацию в атмосфере, поэтому в нашем исследовании модель абляции была дополнена моделью фрагментации. Это позволяет учитывать частичное расплавление и разложение тела на более мелкие фрагменты, что влияет на светимость, продолжительность и радиальную дистрибуцию абляционных струй, а также на итоговую массу, прошедшую через критические слои атмосферы. В исследовании использованы базисные оптические данные наблюдений потока Персеид за 2016 г. При моделировании процесса абляции применена абляционная модель, описывающая процесс расплавления и испарения небольших метеорных тел. В анализ включены метеоры с яркостью менее $-2m$. Дополнительно учтены параметры фрагментации, что позволяет получить более устойчивые оценки массы и плотности по сравнению с моделями без разбиения на фрагменты. В работе предпринята попытка исследовать влияние модели фрагментации на определение параметров метеороидов. Выполнен анализ сходств и различий между полученными параметрами для моделей с и без учета фрагментации. Обсуждены возможные причины расхождений, неоптимизированные параметры абляции и ограниченную точность калибровки наблюдений.

MODEL OF FRAGMENTATION OF SMALL METEOROIDS

V. V. Efremov*

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

**E-mail: vve1994@gmail.com*

The primary method for characterizing small meteoroids (< 1 cm) is analyzing their interaction with the atmosphere. Accurately determining meteoroid parameters, including mass, density, and other characteristics, remains a pressing issue. Meteoroid masses are typically estimated using various ablation models or empirical relationships; observational data serve as the basis for calibrating and validating these estimates. The spread of mass estimates for a single meteor can exceed an order of magnitude, due to numerous factors, including variations in initial conditions, the composition of the meteoroid, and the geometry of its entry into the atmosphere. Most small meteoroids undergo fragmentation in the atmosphere, so in our study, the ablation model was supplemented with a fragmentation model. This allows us to account for partial melting and disintegration of the meteoroid into smaller fragments, which affects the luminosity, duration, and radial distribution of ablation jets, as well as the final mass passing through the critical layers of the atmosphere.

The study utilized baseline optical data from observations of the Perseid meteor shower for 2016. An ablation model describing the melting and evaporation of small meteoroids was used to simulate the ablation process, and meteors with brightnesses below $-2m$ were included in the analysis. Fragmentation parameters were additionally taken into account, allowing for more robust mass and density estimates compared to models without fragmentation. This paper attempts to investigate the influence of the fragmentation model on the determination of meteoroid parameters. An analysis of the similarities and differences between the parameters obtained for models with and without fragmentation is performed. Possible causes of these discrepancies, non-optimized ablation parameters, and the limited accuracy of the observational calibration are discussed.

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ ФАКТОРОВ НА ДРОБЯЩЕЕ И СЕЙСМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВА

Н. Н. Ефремовцев*, В. М. Закалинский, И. Е. Шиповский, Р. Я. Мингазов

Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: noee7@mail.ru*

Рост масштабов открытых горных работ вблизи жилой застройки и объектов производственного назначения, а также необходимость соблюдения требований по сейсмической и экологической безопасности, обуславливают актуальность комплексных исследований воздействия взрывов. Научный подход к решению этих проблем требует комплексного решения взаимосвязанных задач исследования закономерностей влияния важнейших факторов на рациональные параметры буровзрывных работ и вредного воздействия взрывов на окружающую среду, устойчивость горных выработок и охраняемых объектов.

Проводятся исследования с применением физических экспериментов и численного моделирования методом сглаженных частиц (SPH) влияния характеристик взрывчатых веществ, конструкций зарядов ВВ, физико-механических свойств разрушаемых сред, направления трещин в массиве горных пород на интенсивность фрагментации и параметры сейсмического действия взрыва. Триггерные эффекты в наших исследованиях, заключающиеся в разрушении или срыве контактов между отдельными блоками горных пород, рассматриваются во взаимосвязи с увеличением напряжений, сейсмического действия и интенсивности фрагментации во времени и пространстве под воздействием энергии взрыва различных ВВ. Исследования ведутся с применением имитационных композиционных моделей и используемых промышленных взрывчатых веществ с плотностью 0.5–0.65 до 6.5 г/см³ и скоростью детонации от 1.9 до 7.5–8.5 км/сек. Важнейшей составной частью работ являются полигонные испытания ВВ с применением, разработанной в ИПКОН РАН, методики, а также испытательного стенда (взрывной камеры) и специальных конструкций имитационных композиционных моделей, позволяющих осуществлять динамическое воздействие на образцы горных пород и кристаллосырье, расположенных на различном удалении от заряда. Конструкция имитационной композиционной модели позволяет выделить до 9 зон действия взрыва. Методология проведения экспериментов в полном объеме предусматривает отбор и анализ продуктов детонации, замеры и сравнительную оценку параметров сейсмического действия взрыва и ударной воздушной волны. Сортировка и численная оценка гранулометрического состава фрагментов композиционной модели обеспечивает получение данных для построения калибровки цифровых моделей и исследования закономерностей дробления горных пород. В результате исследований [1, 2] получены зависимости изменения фрагментации отдельных участков взрывааемых сред от следующих влияющих факторов:

- расстояния от зарядов промышленных взрывчатых веществ (ПВВ) с различной плотностью, диаметром и энергетической насыщенностью;
- расстояния между скважинами и до свободной поверхности и ее конфигурации;
- величины воздушных промежутков между зарядом и стенкой зарядной полости.

Кроме того, проводятся исследования влияния скорости детонации, направления трещиноватости массива горных пород, параметров подпорной стенки на вектор скорости смещения грунта в различных зонах действия взрыва. Анализ результатов многочисленных экспериментальных полигонных испытаний составов гранулитов и ВВ с конверсионными составляющими показал нелинейную полиномиальную зависимость влияния скорости детонации зарядов различных взрывчатых веществ на результирующий вектор скорости смещения грунта.

Литература

1. Ефремовцев Н.Н., Шиповский И.Е. Исследование закономерностей дробления удлиненными зарядами с применением композиционных моделей и численного моделирования методом сглаженных частиц // Взрывное дело. 2020. Вып. 128 (85). С. 20–37.

2. Ефремовцев Н.Н., Ефремовцев П.Н., Трофимов В.А., Шиповский И.Е. Результаты численных исследований фрагментации горных пород в пределах взрываемого блока с применением бессеточного метода сглаженных частиц // Взрывное дело. 2021. Вып. 130 (87). С. 29–45.

RESEARCH INTO THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL AND NATURAL FACTORS ON THE CRUSHING AND SEISMIC ACTION OF AN EXPLOSION

N. N. Yefremovtsev*, V. M. Zakalinsky, I. E. Shipovsky, R. Y. Mingazov

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences (ICEMR RAS), Moscow, Russia

**E-mail: noee7@mail.ru*

The increasing scale of open-pit mining near residential areas and industrial facilities, as well as the need to comply with seismic and environmental safety requirements, necessitate comprehensive studies of blast impacts. A scientific approach to addressing these issues requires a comprehensive approach to the interrelated challenges of investigating the influence of key factors on the rational parameters of drilling and blasting operations and the harmful impact of blasts on the environment, the stability of mine workings, and protected facilities.

We conduct research using physical experiments and smoothed particle simulation (SPH) to examine the influence of explosive characteristics, explosive charge designs, the physical and mechanical properties of the media being blasted, and the direction of cracks in the rock mass on the intensity of fragmentation and the parameters of the seismic action of a blast. In our research, trigger effects, consisting of the destruction or disruption of contacts between individual rock blocks, are considered in relation to the increase in stress, seismic action, and fragmentation intensity over time and space under the influence of the blast energy of various explosives. The research is conducted using simulation composite models and commercial explosives with densities ranging from 0.5–0.65 to 6.5 g/cm³ and detonation velocities ranging from 1.9 to 7.5–8.5 km/sec. A key component of the work is field testing of explosives using a methodology developed at the Institute of Explosives and Conductivity of the Russian Academy of Sciences, a test rig (explosion chamber), and specially designed simulation composite models that enable dynamic impact on rock samples and crystalline raw materials located at varying distances from the charge. The design of the simulation composite model allows for the identification of up to nine explosion zones. The full experimental methodology includes the collection and analysis of detonation products, measurements, and comparative evaluation of the parameters of the seismic action of the explosion and the shock wave. Sorting and numerical evaluation of the particle size distribution of composite model fragments provides data for constructing calibration models and studying rock fragmentation patterns. Research has yielded relationships between fragmentation changes in individual sections of blasted media and the following influencing factors:

- distance from industrial explosive charges with varying densities, diameters, and energy densities;
- distance between boreholes and to the free surface and its configuration;
- size of air gaps between the charge and the wall of the blast cavity.

In addition, studies are being conducted to examine the influence of detonation velocity, rock mass fracturing direction, retaining wall parameters, and the soil displacement velocity vector in various blast zones. Analysis of numerous experimental field tests of granulite and explosive compositions with conversion components revealed a nonlinear polynomial relationship between the influence of detonation velocity of various explosive charges on the resulting soil displacement velocity vector.

О РАСЧЕТЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В УДАРООПАСНОМ МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД В РАМКАХ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГРАДИЕНТНОГО ТИПА

Д. С. Журкина, С. В. Лавриков*, А. Ф. Ревуженко

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

*E-mail: lvk64@mail.ru

Современная геомеханика развивается по пути усложнения представлений о массиве горных пород как среды, обладающей иерархической внутренней структурой [1–3]. Рассматривается несколько различных подходов к описанию структурно-неоднородных горных пород. Одним из активно развивающихся в настоящее время является подход к построению моделей с микроструктурой [4, 5]. Данные модели относятся к классу моделей обобщенных сред.

В работе используется замкнутая математическая модель [6]. В отличие от классического подхода механики сплошных сред здесь деформация бесконечно малого элементарного объема предполагается неоднородной (неаффинной). На границах элементарных объемов учитываются сдвиги, развивающиеся по нелинейному упругопластическому закону. Для описания кинематики вводятся дополнительные степени свободы – в плоском случае кинематика описывается не одним, а двумя независимыми векторами смещений. Это приводит к появлению в определяющих уравнениях параметра размерности длины, описывающего локальную неоднородность – локальные изгибы. В [7, 8] показано, что модель адекватно предсказывает развитие зон высокой концентрации напряжений в структурно-неоднородных массивах горных пород вблизи выработанного пространства.

В настоящей работе с использованием модели численно решена задача о перераспределении напряжений в приконтурной зоне массива горных пород вблизи системы выработок применительно к одной из технологий добычи на удароопасных месторождениях апатит-нефелиновых руд на Кольском полуострове. Установлено, что при последовательной поэтапной отработке рудного тела в условиях преимущественно тектонического поля естественных напряжений наличие неоднородности среды приводит к перераспределению нагрузки между структурными элементами и к переносу значительной ее доли от границ выработок вглубь массива. Данное обстоятельство существенно увеличивает риски вовлечения в деформационный процесс областей массива с внутренними самоуравновешенными напряжениями [9] и, как следствие, повышает вероятность динамических проявлений горного давления.

Работа выполнена в рамках проекта НИР (номер госрегистрации 126021217129-6).

Литература

1. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. О свойстве дискретности горных пород // Физика Земли. 1982. № 12. С. 3–18.
2. Викулин А.В., Иванчин А.Г. О современной концепции блочно-иерархического строения геосреды и некоторых ее следствиях в области наук о Земле // ФТПРПИ. 2013. № 3. С. 67–84.
3. Лавриков С.В., Ревуженко А.Ф. О деформировании блочной среды вокруг выработки // ФТПРПИ. 1990. № 6. С. 7–15.
4. Куни И.А. Теория упругих сред с микроструктурой. М.: Наука. 1975. – 416 с.
5. Смолин И.Ю. Использование микрополярных моделей для описания пластического деформирования на мезоуровне // Математическое моделирование систем и процессов. 2006. № 14. С. 189–205.
6. Ревуженко А.Ф., Микенина О.А. Упругопластическая модель горной породы с линейным структурным параметром // ПМТФ. 2018. № 2. С. 167–176.
7. Журкина Д.С., Лавриков С.В. К расчету концентрации напряжений в зоне влияния очистного забоя в рамках упругопластической модели градиентного типа // ФТПРПИ. 2024. № 3. С. 24–36.
8. Журкина Д.С., Лавриков С.В., Ревуженко А.Ф. Расчет концентрации напряжений в породном массиве вблизи выработанного пространства на основе нелокальной упругопластической модели // Динамические процессы в геосферах. 2024. Т. 16. № 3. С. 50–62.
9. Lavrikov S.V., Revuzhenko A.F. Mathematical modeling of deformation of self-stress rock mass surrounding a tunnel / Desiderata Geotechnica. Springer Nature Switzerland AG. W.Wu (ed.). 2019. P. 79–85.

ON THE CALCULATION OF STRESS CONCENTRATION IN A ROCK BURST-HAZARDOUS MASSIF WITHIN THE FRAMEWORK OF AN ELASTIC-PLASTIC GRADIENT MODEL

D. S. Zhurkina, S. V. Lavrikov*, A. F. Revuzhenko

Chinakal Mining Institute of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

**E-mail: lvk64@mail.ru*

Modern geomechanics develops concept of rock mass as medium with a hierarchical internal structure. Several approaches are being considered. One of them is the construction of models with microstructure. They belong to the class of generalized media models.

In paper a closed mathematical model is used. Unlike the classical approach, the deformation of an infinitely small elementary volume is assumed to be heterogeneous (non-affine). At the boundaries of elementary volumes, elastoplastic shears are taken into account. To describe the kinematics, additional degrees of freedom are introduced: in the 2D-case, the kinematics is described by not one, but two independent displacement vectors. It leads to the appearance of a length parameter in the constitutive equations. It describes a local bending. It was shown that the model adequately predicts the high stress concentration zones in heterogeneous rock mass.

The model is used for numerical solution the of stress redistribution in a rock mass nearby a system of workings, as applied to a mining technology at rock burst-hazardous apatite-nepheline ore deposits on the Kola Peninsula. It was shown that during sequential sublevel mining under conditions of a tectonic stress field, the heterogeneity leads to a stress redistribution between structural elements and to the transfer of a significant stress portion from the opening contour into deep massif. It increases the risk of self-stressed zones involve in the deformation and provoke the rock burst.

К ВОПРОСУ О КЛАССИФИКАЦИИ ГЛАВНЫХ УДАРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

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

¹Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

²Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Борок, Россия

*E-mail: zavyalov@ifz.ru

Любая наука начинается с классификации изучаемых объектов. Классификация устраняет путаницу и неразбериху. Классифицирование делает людей лучше, мудрее. Для исследователей особо ценно, что классификация ведет нас к предсказаниям и открытиям. В сейсмологии известны разные типы классификации главных ударов землетрясений. Например, по происхождению (природные, техногенные, природно-техногенные), по механизму возникновения (тектонические, вулканические, обвальные (карстовые), морозобойные), по глубине очага (коровые – $h \leq 70$ км, промежуточные – $h = 70\text{--}300$ км, переходная зона мантии, глубокофокусные – $h = 300\text{--}720$ км, верхняя мантия), по пространственному расположению (внутриплитовые, континентальные). Можно предложить и другие классификации.

В данной работе мы предлагаем классифицировать главные удары землетрясений по количеству форшоков – землетрясений, предшествующих главному удару, и количеству афтершоков – повторных ударов, следующих за главным ударом.

Назовем триадой землетрясений естественное триединство форшоков, главного удара и афтершоков [1]. Понятие триады позволяет обогатить систематику (т.е. классификацию и номенклатуру) землетрясений. Пусть N_- – количество форшоков, произошедших за определенный промежуток времени, предшествующий главному удару, а N_+ – количество афтершоков за промежуток такой же продолжительности после главного удара. В своем исследовании мы приняли временной интервал длительностью 24 ч. Этот выбор достаточно произволен. Он не был обусловлен какими-либо специфическими соображениями.

Выберем следующее основание для деления триад на классы. Если $N_- < N_+$, то будем называть триаду классической. Этот класс широко известен и хорошо изучен. Известно, что во многих случаях форшоки отсутствуют, т.е. $N_- = 0$. Если $N_- = 0$, то назовем триаду неполной или укороченной, если же $N_- \neq 0$, то назовем триаду полной. Таким образом, мы имеем признак для деления классических триад на два типа – это количество землетрясений ДО и ПОСЛЕ главного удара и в нашем случае он единственный.

Недавно были обнаружены два класса необычных триад, названных симметричными и зеркальными [2]. В симметричной триаде $N_- = N_+$, в то время как в зеркальной $N_- > N_+$. Симметричная и зеркальная триады также делятся каждая на два типа по критерию, аналогичному тому, который был указан для классических триад: на полные и укороченные.

Форшоки и/или афтершоки могут отсутствовать, но главный удар является неотъемлемым атрибутом каждого класса и каждого типа. Это дает нам возможность классифицировать главные удары по принадлежности к тому или иному классу и типу триады.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН.

Литература

1. Завьялов А.Д., Зотов О.Д., Гульельми А.В., Клайн Б.И. Триады землетрясений: определение, классификация, основные свойства: Тезисы докладов IX Всероссийской научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 2023. с. 59.
2. Зотов О.Д., Гульельми А.В., Завьялов А.Д., Клайн Б.И. Неполные симметричные триады тектонических землетрясений: Аннотации докладов 6-ой Всероссийской тектонофизической конференции. Москва. 2024. с. 49.

ON THE CLASSIFICATION OF TECTONIC EARTHQUAKE MAINSHOCKS

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

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

²*Geophysical Observatory Borok – branch of the O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Borok, Russia*

*E-mail: zavyalov@ifz.ru

Any science begins with the classification of the objects under study. Classification makes people better and wiser. For researchers, it's especially valuable that classification leads us to predictions and discoveries. In seismology, various classifications of main earthquakes are known. For example, by origin (natural, man-made, natural-man-made), by mechanism (tectonic, volcanic, landslide (karst), frost-punch), by focal depth (crustal – $h \leq 70$ km, intermediate – $h = 70\text{--}300$ km, transition zone of the mantle, deep-focus – $h = 300\text{--}720$ km, upper mantle), and by spatial location (intraplate, continental, interplate). Other classifications can also be proposed.

In this paper, we propose classifying earthquake mainshocks by the number of foreshocks – earthquakes preceding the mainshock, and the number of aftershocks – repeated shocks following the mainshock.

We will call this natural trinity of foreshocks, mainshocks, and aftershocks as an earthquake triad. The concept of a triad allows us to enrich the systematics (i.e., classification and nomenclature) of earthquakes.

Let N_- – be the number of foreshocks that occurred during a given time interval preceding the mainshock, and N_+ – be the number of aftershocks during a period of the same duration after the mainshock. In our study, we adopted a time interval of 24 hours. This choice is rather arbitrary and was not driven by any specific considerations.

Let's choose the following basis for dividing triads into classes. If $N_- < N_+$, then we'll call the triad classical. This class is widely known and well-studied. It's known that in many cases, foreshocks are absent, i.e., $N_- = 0$. If $N_- = 0$, then we'll call the triad incomplete or truncated, while if $N_- \neq 0$, then we'll call the triad complete. Thus, we have a criterion for dividing classical triads into two types: the number of earthquakes BEFORE and AFTER the mainshock, and in our case, it's the only one.

Recently, two classes of unusual triads, termed symmetrical and mirror triads, have been discovered. In a symmetrical triad, $N_- = N_+$, while in a mirror triad, $N_- > N_+$. Symmetrical and mirror triads are also divided into two types, each using criteria similar to those specified for classical triads: full and truncated.

Foreshocks and/or aftershocks may be absent, but the mainshock is an essential attribute of each class and each type. This allows us to classify mainshocks according to their membership in a particular class and type of triad.

**ОЦЕНКА ПРЕДВЕСТНИКОВ КАМЧАТСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 29 ИЮЛЯ 2025 г.
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОБРАБОТКИ ГНСС ИЗМЕРЕНИЙ**

Р. В. Загретдинов*, А. А. Загретдинов, В. Ф. Бахтиаров

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», Казань, Россия

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

В докладе проводится оценка гипотезы Q. Bletery, J.-M. Nocquet [1] об усилении локальных движений земной поверхности за два часа до момента мощного землетрясения с моментальной магнитудой более 7. Проверка данной гипотезы проводилась по результатам обработки ГНСС измерений проводившихся в зоне, подвергшейся влиянию супермощного Камчатского землетрясения 29 июля 2025 г. с магнитудой 8.8. Показано, что достигнутый в последнее десятилетие прогресс в области высокоточных ГНСС технологий позволяет существенно повысить точность и оперативность определения координат пунктов ГНСС наблюдений.

Обработка измерений с двух расположенных в семи метрах друг от друга в г. Северо-Курильске пунктов фундаментальной астрономо-геодезической сети SVK1 и SVK2 с ГНСС приемниками разных производителей (Leica GR50 и Javad Omega3) проводилась двумя разными программными сервисами (CSRS-PPP и WebPPP). Такой подход позволил оценить влияние на результаты вычислений как внутренних ошибок самих ГНСС приемников и их антенн, так и использование разных алгоритмов обработки, в которых применялись взятые из разных источников точные орбиты навигационных спутников.

Для пунктов SVK1 и SVK2 двумя программными сервисами была проведена кинематическая обработка тридцатисекундных ГНСС измерений, а для пунктов SVK1 и 41PT была также проведена кинематическая обработка и секундных измерений. Полученные временные ряды изменений координат демонстрируют значимые изменения как плановых, так и высотных компонент пунктов SVK1 и SVK2 приблизительно за два часа до момента основного толчка супермощного Камчатского землетрясения 29 июля 2025 г. В тоже время для пункта 41PT, который находился существенно ближе к эпицентру землетрясения значимых изменений координат за два часа до толчка не обнаружено. Надо отметить, что и плановые изменения координат ГНСС пунктов в г. Петропавловск-Камчатский, в том числе и пункта 41PT, сразу после основного толчка составили около 65 см. В тоже время для пунктов SVK1 и SVK2 эти изменения составили 169 см.

В случае подтверждения гипотезы Bletery и Nocquet можно рекомендовать оснащать сейсмоактивные зоны страны парными ГНСС пунктами с приемниками разных производителей в том числе, использующих технологию PPP Real Time с одновременной обработкой секундных измерений не менее чем двумя программными продуктами. Такие комплексные пункты ГНСС мониторинга могут позволить на наш взгляд в перспективе разработать технологии предсказания мощных землетрясений моментальной магнитудой более 8.

Литература

1. Bletery Q., Nocquet J.-M. The precursory phase of large earthquakes // Science. 2023. Vol. 381 (6655). P. 297–301.

ASSESSMENT OF THE KAMCHATKA EARTHQUAKE PRECURSORS ON JULY 29, 2025, BASED ON THE RESULTS OF GNSS MEASUREMENT PROCESSING

R. V. Zagretdinov*, A. A. Zagretdinov, V. F. Bakhtiarov

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Kazan (Volga Region) Federal University», Kazan, Russia

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

The report evaluates the hypothesis of Q. Bletery, J.-M. Nocquet, which suggests an increase in local surface movements two hours before a powerful earthquake with an instantaneous magnitude of more than 7. This hypothesis was tested using GNSS measurements taken in the area affected by the super-powerful Kamchatka earthquake on July 29, 2025, with a magnitude of 8.8. The report demonstrates that the recent advancements in high-precision GNSS technologies have significantly improved the accuracy and efficiency of determining the coordinates of GNSS observation points.

The processing of measurements from two Fundamental Astronomical and Geodetic Network (FAGN) stations SVK1 and SVK2 located seven meters apart in the city of Severo-Kurilsk, equipped with GNSS receivers from different manufacturers (Leica GR50 and Javad Omega3), was carried out using two different software services (CSRS-PPP and WebPPP). This approach allowed us to evaluate the impact of both internal errors in the GNSS receivers and their antennas, as well as the use of different processing algorithms that relied on accurate orbits of navigation satellites obtained from different sources.

For the SVK1 and SVK2 stations, the thirty-second GNSS measurements were processed by two software services in kinematic mode, and for the SVK1 and 41PT stations, the second-second measurements were also kinematically processed. The resulting time series of coordinate changes demonstrate significant changes in both the horizontal and height components of the SVK1 and SVK2 stations approximately two hours before the main shock of the super-powerful Kamchatka earthquake on July 29, 2025. However, for the 41PT station, which was significantly closer to the earthquake's epicenter, no significant changes in coordinates were observed two hours before the shock. It should be noted that the horizontal changes in the coordinates of the GNSS stations in Petropavlovsk-Kamchatsky, including the 41PT station, immediately after the main shock were approximately 65 cm. In contrast, for the SVK1 and SVK2 stations, these changes were 169 cm.

If the Bletery and Nocquet hypothesis is confirmed, it can be recommended to equip the country's seismically active zones with paired GNSS stations equipped with receivers from different manufacturers, including those using PPP Real Time technology with simultaneous processing of second-by-second measurements using at least two software products. In our opinion, such comprehensive GNSS monitoring stations can potentially lead to the development of technologies for predicting powerful earthquakes with an magnitude of more than 8.

ИЗМЕНЕНИЕ ЧАСТОТ ШУМАНОВСКИХ РЕЗОНАНСОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

К. А. Зенин*

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: zenin.ka@idg.ras.ru*

Шумановские резонансы — электромагнитное излучение в полости Земля–ионосфера с резонансными частотами, близкими к 8, 14, 20, ... Гц. Существование таких резонансов предсказал В. О. Шуман в 1952 г. Эти резонансы возбуждаются грозовыми разрядами, происходящими по всей планете каждую секунду. Частоты шумановских резонансов определяются параметрами нижней ионосферы Земли, в частности – высотой границы ионосферы над поверхностью. При изменении параметров ионосферы частоты резонансов также изменяются. Солнечные вспышки представляют собой взрывы в атмосфере Солнца, вызванные перестройкой магнитных полей. Они сопровождаются интенсивным излучением в рентгеновском диапазоне, которое на 3–4 порядка превышает уровень излучения в обычных условиях. Это скачок в интенсивности ведёт к изменению параметров ионосферы.

Целью данной работы являлось нахождение эмпирической зависимости вариаций частот первых мод шумановских резонансов от интенсивности излучения в жёстком рентгеновском диапазоне. В процессе проанализированы около полсотни вспышек X-класса и около сотни вспышек M-класса в промежутке с 2011 по 2023 гг..

Для определения частот шумановских резонансов использовались данные, полученные из геофизической обсерватории Института динамики геосфер РАН в «Михнево», в 100 км южнее Москвы (54.96° N, 37.76° E), где установлены два магнитометра, измеряющие компоненты магнитного поля Земли с высоким временным разрешением. Частоты резонансов рассчитывались из записей магнитного поля с помощью аппроксимации лоренцианами. Вариации параметров рассчитывались как отклонения от среднего тренда. Данные об интенсивности рентгеновского излучения солнечных вспышек получены из архивов спутников GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites) — американских геостационарных метеорологических спутников. Эти спутники непрерывно мониторят солнечную активность и рентгеновское излучение в различных диапазонах длин волн, полученные приборами XRS (X-Ray Sensor) на борту спутников GOES. Общий диапазон измерений рентгеновского излучения – 0.05–0.8 нм.

Была выявлена пропорциональная зависимость между вариациями частот и логарифмом излучения в диапазоне до 0.3 нм. Для расчета интенсивности в этом диапазоне сначала рассчитывалась эффективная яркостная температура в приближении модели абсолютно черного тела. Затем через неё находилась искомая интенсивность с помощью формулы Планка. Также выявлено, что резонансные частоты у более высоких мод изменяются сильнее, чем у низких.

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

SCHUMANN RESONANCES FREQUENCIES MODIFICATION DUE TO X-RAY IRRADIANCE DURING SOLAR FLARES

К. А. Zenin*

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

** E-mail: zenin.ka@idg.ras.ru*

Schumann resonances are electromagnetic radiation in the cavity between Earth and its ionosphere with resonant frequencies close to 8, 14, 20, ... Hz. The existence of such resonances was predicted by W. O. Schumann in 1952. These resonances are excited by lightning discharges, which happen on the whole planet every second. The Schumann resonances frequencies are determined by parameters of Earth's lower ionosphere, particularly by its boundary position above the ground. A change in the parameters inflicts a change in resonance frequencies as well. Solar flares are bursts in Sun's atmosphere, caused by magnetic fields

restructuring. They are followed by intense x-ray irradiation, which in 3-4 times exceeds the level of irradiation during normal conditions. This leap leads to a ionosphere parameters modification.

The purpose of this study was to find an empirical dependence between first few modes of Schumann resonances frequencies variations and hard x-ray irradiance. During the process about half a hundred X-class and about one hundred M-class flares were examined in a range from 2011 to 2023.

The Schumann resonances frequencies were determined by data from Institute's of geosphere dynamics geophysical observatory in «Miknevo» City District. There are two magnetometers installed there, which measure components of Earth's magnetic field with high temporal resolution. The resonances frequencies were calculated from magnetic field records via lorentzians approximation. The parameter variations were calculated as deviations from the trend. The x-ray irradiance data were received from GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites) archive. These satellites monitor solar activity and x-ray irradiance in various wavelength ranges. The total range of x-ray irradiance measurements is 0.05–0.8 nm.

There was a proportional relation found between frequencies variations and a logarithm of irradiance in a range below 0.3 nm. To calculate the irradiance in this range first a brightness temperature was calculated by means of black body model. Then the irradiance was calculated using the Planck's formula. It was also found that higher modes produce higher variations.

ТЕХНОГЕННЫЕ ТРИГГЕРЫ ГЛОБАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ

О. Д. Зотов^{1,2,*}, А. Д. Завьялов², А. В. Гульельми²

¹Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Борок, Россия

²Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: ozotov@inbox.ru

Работа посвящена особой категории искусственных экзогенных периодических триггеров землетрясений. Триггеры землетрясений разделяются на два типа – естественные и искусственные. Каждый тип содержит класс эндогенных и класс экзогенных триггеров. В каждом классе естественно выделить два вида: периодические и аperiodические триггеры. Наконец, каждый вид содержит четыре разновидности – механические, электромагнитные, тепловые и химические триггеры. Предлагаемая систематика содержит 2 типа, 4 класса, 8 видов и 32 разновидности. Экспериментальные данные свидетельствуют о влиянии на сейсмическую активность физических полей различной природы. Промышленная деятельность характеризуется многообразием генерируемых физических полей и имеет те же периодичности, которые мы обнаруживаем в литосфере. Отличительная особенность искусственных экзогенных периодических триггеров землетрясений в том, что их антропогенное происхождение не вызывает сомнения, но физическое происхождение не известно. Указанные особые триггеры проявляют себя в эффекте выходных дней и в эффекте часовых меток. Представлены свидетельства реальности недельной модуляции глобальной сейсмичности. Аргументы в пользу реальности эффекта часовых меток подкреплены анализом энергопотребления в одном из самых энергонасыщенных регионов планеты. Обнаружена часовая пульсация энергопотребления, синхронизованная по часам мирового времени, что проливает некоторый свет на происхождение эффекта часовых меток в глобальной сейсмичности. Рассмотренные периодичности в сейсмической активности представляют собой реальное геофизическое явление, сформированное в результате нецеленаправленного техногенного воздействия на литосферу. Конкретный физический механизм такого явления остается неясным.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания Института физики Земли имени О. Ю. Шмидта РАН.

MAN-MADE TRIGGERS OF GLOBAL SEISMICITY

O. D. Zotov^{1,2}, A. D. Zavyalov², A. V. Gulyelmi²

¹Geophysical Observatory Borok – branch of the O. Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Borok, Russia

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

*E-mail: ozotov@inbox.ru

This work examines a special category of artificial exogenous periodic earthquake triggers. Earthquake triggers are divided into two types: natural and artificial. Each type contains a class of endogenous and a class of exogenous triggers. Within each class, it is natural to distinguish two subtypes: periodic and aperiodic triggers. Finally, each subtype contains four varieties: mechanical, electromagnetic, thermal, and chemical triggers. The proposed taxonomy contains two types, four classes, eight types, and 32 varieties. Experimental data indicate the influence of physical fields of various origins on seismic activity. Industrial activity is characterized by a variety of generated physical fields and exhibits the same periodicities found in the lithosphere. A distinctive feature of artificial exogenous periodic earthquake triggers is that their anthropogenic origin is undoubted, but their physical origin is unknown. These special triggers manifest themselves in the weekend-effect and the clock-marks effect. Evidence is presented for the reality of weekly modulation in global seismicity. Arguments

in favor of the existence of the clock-marks effect are supported by an analysis of energy consumption in one of the most energy-saturated regions of the planet. An hourly pulsation in energy consumption, synchronized with universal time, is detected, shedding some light on the origin of the clock-marks effect in global seismicity. The examined periodicities in seismic activity represent a real geophysical phenomenon formed as a result of unintended anthropogenic impact on the lithosphere. The specific physical mechanism of this phenomenon remains unclear.

КОНЦЕПЦИЯ РАНЖИРОВАНИЯ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННОЙ ГЕОСИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Г. Н. Иванченко*, Э. М. Горбунова

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

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

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) является интенсивно развивающимся способом получения объективных данных о геосферах Земли. Дешифрирование данных ДЗЗ – это один из важнейших методов исследования геодинамических процессов в литосфере. Практика работы с пространственными данными показала, что для полноценного морфоструктурного анализа территорий целесообразно применять современные геоинформационные системы (ГИС), которые позволяют накапливать и интегрировать информацию о природных и техногенных процессах, оперативно отображать и оценивать пространственно-временные характеристики ландшафта. В ГИС имеется возможность объединения геологической и геофизической информации, включая тематические карты, географические базы данных, ДЗЗ.

Современный этап развития методов и технологий обработки и анализа данных космической съемки характеризуется все более важной ролью автоматизированных методов. Компьютерное дешифрирование космоснимков и цифровых моделей рельефа (ЦМР) обладает повторяемостью результатов при сохранении параметров обработки. Для получения качественного результата крайне важен накопленный опыт параметризации алгоритмов и методики интерпретации данных в природно-техногенных геосистемах.

Отдельное направление представляет дешифрирование линейных элементов рельефа (линеаментов), основанное на статистическом анализе их пространственного и углового распределения. При интерпретации первичных данных дистанционного зондирования проводится сравнение полученных результатов с материалами геологической съемки территории исследований и топопланами. Методический подход, использованный при анализе тестовых объектов, расположенных на Семипалатинском полигоне, может быть применен при исследовании природно-техногенной геосистемы Курской магнитной аномалии (КМА).

В качестве примера выбран участок открытой и подземной разработки железорудных месторождений КМА. Геодинамическая обстановка региона формируется не только под влиянием природных процессов, но и техногенной нагрузки, сопоставимой по уровню воздействия на геологическую среду. Среди современных экзогенных процессов в первую очередь следует отметить линейную и овражную эрозию, плоскостной смыв, карст и суффозию. Техногенные процессы получают преимущественное развитие по бортам карьеров, на отвалах и шламохранилищах.

На космических снимках хорошо дешифрируются техногенные элементы разных типов. Одним из основных параметров ранжирования территории исследований является насыщенность участка техногенными формами. Природный рельеф сильно изменен горнодобывающей деятельностью. В пределах участка отчетливо выделяются отрицательные формы рельефа – карьеры и положительные – отвалы, шламохранилища. Карьеры диаметром от 3 до 5 км достигают глубины от 200 до 300 м, высота отвалов превышает 80 м. Формирование гидроотвалов и шламохранилищ в балках и оврагах приводит к выполаживанию рельефа.

Детальный анализ геолого-экологической обстановки района КМА является основой для ранжирования территории исследований по интенсивности техногенной нагрузки. В качестве критерия выделения потенциально опасных участков, подлежащих рекультивации, может рассматриваться соотношение между протекающими природными и техногенными геодинамическими процессами.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012200570-5).

A CONCEPT FOR RANKING NATURAL-TECHNOGENIC GEOSYSTEMS BASED ON REMOTE SENSING DATA

G. N. Ivanchenko*, E. M. Gorbunova

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

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

Earth remote sensing (ERS) is a rapidly developing method for obtaining objective information about the Earth's geospheres. Interpreting ERS data is one of the most important methods for studying geodynamic processes in the lithosphere. Experience with spatial data has shown that for a comprehensive morphostructural analysis of territories, it is advisable to use modern geo-information systems (GIS), which allow for the accumulation and integration of information on natural and anthropogenic processes, and efficient display and evaluate spatiotemporal characteristics of landscapes. GIS can combine geological and geophysical information, including thematic maps, geographic databases, and ERS.

The current stage of developing methods and technologies for processing and analyzing satellite imagery data is characterized by an increasingly important role of automation. Computer interpretation of satellite images and digital elevation models (DEMs) offers repeatable results, while maintaining processing parameters. To obtain a high-quality result, the accumulated experience of parameterization of algorithms and methods of interpreting data in natural-technogenic geosystems is extremely important.

A specific area is the interpretation of linear relief elements (lineaments), based on statistical analysis of their spatial and angular distribution. For interpreting primary remote sensing data, the obtained results are compared with geological survey data of the study area and topographic maps. The methodological approach used to analyze test sites located at the Semipalatinsk Test Site can be applied to explorations of natural-technogenic geosystems, namely, the Kursk Magnetic Anomaly (KMA).

A site of open-pit and underground iron ore recovery at KMA was taken as an example. The geodynamic situation in the region is formed not only under the influence of natural processes, but also by the anthropogenic load, both items being comparable in terms of impact on the geological environment. Among current exogenous processes, the most notable are linear and gully erosion, sheet washout, karst, and suffusion. Anthropogenic processes primarily develop along the sides of quarries, at dumps and sludge ponds.

Space images clearly reveal anthropogenic elements of different types. One of the key parameters for ranking the area under study is the saturation of the site with anthropogenic forms. The natural topography has been significantly altered by mining activities. Within the site, negative relief forms (quarries) and positive ones (such as waste heaps and sludge ponds) are clearly visible. Quarries, ranging from 3 to 5 km in diameter, reach depths of 200 to 300 meters, while waste heaps exceed 80 meters in height. Locating hydraulic waste heaps and sludge ponds in gullies and ravines leads to flattening of the relief.

A detailed analysis of the geological and environmental conditions in the KMA region is a basis for ranking the area under study via the intensity of anthropogenic impact. The ratio between natural and anthropogenic geodynamic processes can be considered as a criterion for identifying potentially hazardous areas, that should be reclaimed.

ВЛИЯНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ВДОЛЬ ТРАСС СЕЙСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

Г. Н. Иванченко, И. А. Санина*

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: iasanina51@gmail.com*

Рассмотрено влияние геологических структур в Центральной части ВЕП на вариации динамических характеристик сейсмических волн, зарегистрированных малоапертурной группой «Михнево». Источниками сейсмических волн являлись взрывы на карьерах Новогуровский, Михайловский, Кораблинский и группы карьеров в районе городов Коломны и Венев. Карьеры расположены в различных геодинамических и тектонических районах относительно МСГ «Михнево», что определяет различия в трассах сейсмических лучей и может влиять на соотношения амплитуд продольных и поперечных волн. Рассмотренные нами вариации отношения амплитуд сейсмических волн (A_s/A_p) в зависимости от трассы сейсмических лучей и эпицентрального расстояния выявили их существенные различия. Так, для близких карьеров Новогуровский и Венев отмечен временной тренд, а для карьеров в районе г. Коломны подобный тренд отсутствует. Для удаленных карьеров Михайловский и Кораблинский тренд также практически отсутствует. Ранее зависимость поведения отношения (A_s/A_p) рассматривалась авторами для карьеров Центра Восточно-Европейской платформы (Новогуровский) и вблизи г. Коломны [1].

Опишем кратко геологическое строение мест расположения карьеров: Михайловский ГОК приурочен к Щигровскому своду Воронежского кристаллического массива, которому соответствует поднимающаяся на неотектоническом этапе центральная часть Воронежской антеклизы. В районе Михайловского ГОКа фиксируется субмеридиональный глубинный разлом, не активный на современном этапе. Новогуровский карьер, группа карьеров Венев и Кораблинский карьер находятся на северном и северо-восточном склоне Воронежской структуры. К окраинной части Воронежского кристаллического массива, которому в осадочном чехле соответствует Воронежская антеклиза, приурочены глубинные разломы ЮЗ-СВ и субмеридионального направления. Кораблинский карьер соотносится с глубинным разломом, сопряженным с юго-западным бортом Пачелмского авлакогена. Группа карьеров Коломны расположена в районе Московской синеклизы, испытывающей на неотектоническом этапе слабые нисходящие движения. Коломенские карьеры приурочены к периклинальному замыканию Пачелмского авлакогена. Эти данные свидетельствуют о значительной раздробленности земной коры исследуемого региона.

При автоматизированном дешифрировании были выделены зоны сгущения трещиноватости и локализации деформаций. Михайловский, Кораблинский и Коломенский карьеры расположены в их пределах.

Исследование выполнено в рамках государственных заданий Министерства науки и высшего образования РФ (темы №№ 125012200570-5, 125012200561-3).

Литература

1. Санина И.А., Иванченко Г.Н., Константиновская Н.Л., Усольцева О.А. Временные вариации динамических характеристик сейсмических волн и их связь с геолого-структурными условиями центра Восточно-Европейской платформы // Вопросы инженерной сейсмологии. 2024. Т. 51. № 4. С. 73–84.

INFLUENCE OF THE GEOLOGICAL STRUCTURE ALONG THE SEISMIC RAY PATHS ON THE DYNAMIC PARAMETERS OF SEISMIC WAVE

G. N. Ivanchenko, I. A. Sanina*

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

**E-mail: iasanina51@gmail.com*

The influence of geological structures in the Central part of the VEP on variations in the dynamic characteristics of seismic waves recorded by the small-aperture «Mikhnevo» array is considered. The sources of seismic waves were explosions at the Novogurovsky, Mikhailovsky, Korablinsky quarries and groups of quarries in the Kolomna and Venev area. The quarries are located in different geodynamic and tectonic regions relative to the Mikhnevo SASA, which determines the differences in the seismic ray paths and can affect the amplitude ratios of longitudinal and transverse waves.

The variations in the ratio of seismic wave amplitudes (A_s/A_p) considered by us, depending on the route of the seismic rays and the epicentral distance, revealed their significant differences. For example, a temporary trend has been noted for the nearby quarries Novogurovsky and Venev, while there is no such trend for quarries in the Kolomna area. There is also practically no trend for the remote Mikhailovsky and Korablinsky quarries.

Previously, the relationship behavior dependence (A_s/A_p) was considered by the authors for the quarries of the Center of the Eastern European Platform – Novogurovsky and quarries near Kolomna.

Let us briefly describe the geological structure of the quarries: The Mikhailovsky GOK is confined to the Shchigrovsky vault of the Voronezh crystalline massif, which corresponds to the central part of the Voronezh antecline rising at the neotectonic stage. A submeridional deep fault is recorded in the Mikhailovsky GOK area, which is not active at the present stage. The Novogurovsky quarry, the Venev group of quarries and the Korablinsky quarry are located on the northern and northeastern slopes of the Voronezh structure. The marginal part of the Voronezh crystalline massif, which corresponds to the Voronezh antecline in the sedimentary cover, is associated with deep faults of the South-South and the submeridional direction. The Korablinsky quarry correlates with a deep fault associated with the southwestern side of the Pachelma aulacogene. The Kolomna quarry group is located in the area of the Moscow Syncline, which is experiencing weak downward movements at the neotectonic stage. The Kolomna quarries are confined to the periclinal closure of the Pachelma aulacogene. These data indicate a significant fragmentation of the Earth's crust in the studied region.

During automated decryption, areas of thickening of fractures and localization of deformations were identified. Mikhailovsky, Korablinsky and Kolomenskoye quarries are located within their boundaries

ДИНАМИКА СМЕЩЕНИЙ И СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ В МОДЕЛИ СЕЙСМОГЕННОГО РАЗЛОМА

П. А. Казначеев*, А. В. Пономарев, З.-Ю. Я. Майбук, Д. В. Краюшкин, А. Б. Сырицкий

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

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

В докладе анализируются кинематические и динамические параметры эпизодов смещений в слайдер-модели сейсмогенного разлома, и микротопография (шероховатость) поверхностей бортов модельного разлома. Кинематические параметры представлены низкочастотными данными по изменению смещения и высокочастотными данными по изменению ускорения. Динамические параметры представлены сдвиговым усилием. Поверхность разлома изучена методом профилометрии с микронным разрешением по высоте.

Обнаружено, что ход кривой ускорения при подвижке в модели разлома (модельном землетрясении) демонстрирует особенности – неравномерное нарастание ускорения с последующим выходом на равноускоренное движение со спорадическим возникновением высокочастотных колебаний. Характерные частоты колебаний соответствуют резонансной частоте пьезоэлектрического датчика ускорения и её гармоникам (45–50, 90–100 кГц и др.). Предположительно, это свидетельствует о наличии соответствующих высокочастотных составляющих в движении, связанных с взаимным зацеплением новых микронеровностей рельефа поверхности бортов разлома. В это же время низкочастотная составляющая ускорения остается примерно постоянной – в целом борт разлома продолжает равноускоренное движение. При достижении характерной скорости порядка 10–100 мм/с начинается стадия торможения, заканчивающаяся остановкой подвижки.

Данные профилометрии поверхностей бортов разлома, проведенной после экспериментов, показывают, что в микрорельефе доминируют две-три характерные особенности со значительным перепадом высот порядка 20–50 мкм. Остальной микрорельеф демонстрирует примерно стабильную шероховатость с незначительным перепадом высот (максимально до 5 мкм).

На основе кинематических данных проведено восстановление и анализ смещений вдоль модельного разлома и их сопоставление с данными профилометрии.

DISPLACEMENT DYNAMICS AND SURFACE PROPERTIES IN A MODEL OF SEISMOGENIC FAULT

P. A. Kaznacheev*, A. V. Ponomarev, Z.-Yu. Y. Maibuk, D. V. Krayushkin, A. B. Syritsky

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

p_a_k@mail.ru

In the work, we analyze kinematic and dynamic parameters of displacement episodes in the slider model of a seismogenic fault, and the microtopography (roughness) of surfaces of sides of model fault. Kinematic parameters are represented by low-frequency data on displacement change and high-frequency data on acceleration change. Dynamic parameters are represented by shear force. The fault surface was studied by profilometry with micron resolution in height.

It was found that acceleration during displacement in fault model (model earthquake) demonstrates features – uneven increase followed by motion with constant acceleration and sporadic occurrences of high-frequency oscillations. Characteristic oscillation frequencies correspond to the resonant frequency of the piezoelectric acceleration sensor and its harmonics (45–50, 90–100 kHz, etc.). Presumably, this indicates the presence of corresponding high-frequency components in movement associated with mutual clutch of new microasperity of surface relief of fault sides. At the same time, the low-frequency component of acceleration remains approximately constant – in general, sides of fault continues to move stable. When characteristic speed of about 10–100 mm/s is reached, the braking stage begins, ending with stop of movement.

The profilometry data of fault sides, carried out after experiments, show that two or three characteristic features with significant height difference of about 20–50 microns dominate in microrelief. The rest of microrelief shows approximately stable roughness with a slight height difference (up to 5 microns).

Based on kinematic data, the reconstruction and the analysis of displacements along the model fault and their comparison with profilometry data were carried out

АНАЛИЗ МЕТЕОРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

А. П. Карташова^{1,*}, О. П. Попова², А. К. Муртазов³, В. С. Жабин³, В. В. Ефремов²

¹*Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия*

²*Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия*

³*Рязанский государственный университет имени С. А. Есенина, Рязань, Россия*

**E-mail: akartashova@inasan.ru*

Метеорные наблюдения используются для решения фундаментальных и прикладных задач, исследования популяции малых тел Солнечной системы и ее эволюции, решения задач астероидно-кометной опасности. Базисные метеорные наблюдения позволяют нам получать наиболее полные характеристики каждой метеорной частицы и потоков метеорных частиц. Поэтому наблюдения проводились с нескольких пунктов (базисно): Звенигородская обсерватория ИНАСАН – Геофизическая обсерватория «Михнево» ИДГ РАН – Астрономическая обсерватория РГУ, что позволило получить индивидуальные параметры для каждого метеорного явления. Наблюдения проводятся в круглогодичном и круглосуточном режиме (мониторинг). Также, перед началом наблюдений был проведен анализ метеорных систем, используемых в настоящее время. Для наблюдений были выбраны широко используемые камеры, например, в рамках проекта Global Meteor Network (GMN). Были выбраны из доступных и установлены камеры Sony IMX 307 с объективами диаметром 4 мм (с полем зрения $87^\circ \times 45^\circ$), используемые метеорные установки позволяют регистрировать метеоры до +5 звездной величины. При проведении наблюдений и первичной обработки использовалось программное обеспечение RMS. Метеорные наблюдения проводились систематически, т.е. каждую ночь, что позволяет охватить мониторингом и период действия сильных метеорных потоков. В результате наблюдений были зарегистрированы метеорные события на каждом пункте. Для каждого зарегистрированного метеора проводилась астрометрическая и фотометрическая обработка на основе известных (опорных) звезд в кадре. Вначале для каждого зарегистрированного метеора определяются время пролета, координаты вдоль трека, скорость, угол входа, высоты загорания и потухания, изменение звездной величины в течение пролета метеора. Далее проводится поиск метеоров, зарегистрированных с двух пунктов (базисно). Для каждого из таких метеоров определяются их геоцентрический радиант, геоцентрическая скорость, орбитальные параметры, абсолютная звездная величина, масса частиц, проводится идентификация с известными метеорными потоками. Для расчета параметров метеоров и изучения различных методов вычисления, использовались две программы обработки RMS и UFO, которые дали независимые оценки параметров, которые оказались очень близкими. Одновременно с метеорными частицами были зарегистрированы болиды. Получены оценки их параметров.

ANALYSIS OF METEOR OBSERVATIONS

A. P. Kartashova^{1,*}, O. P. Popova², A. K. Murtazov³, V. S. Zhabin³, V. V. Efremov²

¹*Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³*Ryazan State University, Ryazan, Russia*

**E-mail: akartashova@inasan.ru*

Meteor observations are used to solve fundamental and practical tasks, to study the population of small bodies of the Solar system and its evolution, to solve problems of asteroid and comet hazards. Double-stations meteor observations allow us to obtain the characteristics of each meteor particle and meteor particle showers. Therefore, the observations were carried out from several points: Zvenigorod Observatory INASAN – the «Mikhnevo» Geophysical Observatory IDG RAS – the Astronomical Observatory RSU, which allowed us to obtain individual parameters for each meteor event. Observations are carried out year-round and 24 hours (monitoring). Also, before the start of the observations, an analysis of the currently used meteor systems was carried out. Widely used cameras were chosen for our observations, for example, as part of the Global Meteor

Network (GMN) project. Sony IMX 307 cameras with lenses with a diameter of 4 mm (with a field of view of $87^\circ \times 45^\circ$) were selected and installed, the meteor systems allow to register meteors up to +5 magnitude. The RMS software was used for conducting observations and primary processing. Meteor observations were carried out systematically, i.e. every night, which allows monitoring to cover the period of strong meteor showers. As a result of the observations, meteor events were recorded at each location. For each recorded meteor, astrometric and photometric processing was performed based on known (reference) stars in the frame. Initially, for each recorded meteor, the time of the flight, coordinates along the track, velocity, angle of entry, heights of beginning and ending, and the change in magnitude during the meteor track are determined. Next, a search is carried out for meteors registered from two points. For each of these meteors, their geocentric radiant, geocentric velocity, orbital parameters, absolute magnitude, particle mass are determined, and identification with known meteor showers is carried out. To calculate meteor parameters and study various calculation methods, two RMS and UFO processing programs were used, which gave independent estimates of the parameters, which turned out to be very close. Simultaneously with meteor particles, fireballs were also registered. Estimates of their parameters have been obtained.

ЭВОЛЮЦИЯ СДВИГОВОЙ ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ КАК ВЕРОЯТНЫЙ ТРИГГЕР КАМЧАТСКОГО МЕГАЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

В. И. Кафтан*, П. А. Докукин

Геофизический центр Российской академии наук, Москва, Россия

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

Геодезические непрерывные наблюдения на ГНСС станциях, расположенных в сейсмоактивных регионах, на протяжении последних десятилетий активно используются для изучения современных движений и деформаций земной коры. При этом часто обнаруживаются аномальные деформации, развивающиеся в пространстве и времени согласованно с характером хода региональной сейсмичности. Особый интерес возникает при изучении эволюции горизонтальной деформации полного сдвига. Эта характеристика часто проявляется в виде триггерного воздействия на подготовленный сейсмический очаг. Отследить закономерности сейсмодеоформационного процесса позволяют специально создаваемые кинематические визуализации, синоптический анализ которых обеспечивает проверку тех или иных гипотез взаимосвязи деформаций и сейсмической активности. Первый случай перемещения аномальной горизонтальной деформации сдвига к поверхностной части очага будущего сильного землетрясения был обнаружен в связи с землетрясением Напа (август 2014 г., М6.0). Бегущая аномалия возникла в эпицентре пары умеренных землетрясений и переместилась примерно на 200 км за 9 лет, последовательно сопровождаясь сильным и умеренным событиями, по мере контакта ее фронта с областями будущих эпицентральных зон. Аналогичное развитие деформации полного сдвига было зарегистрировано в регионах западного побережья Северной Америки, Восточной Турции, Эгейского моря, Новой Зеландии, Японского архипелага и Тайваня. Исследования показали, что плотные сети ГНСС обеспечивают наилучшее пространственное разрешение синоптических визуализаций.

Одно из сильнейших землетрясений за историческое время с М8.8 произошло 29 июля 2025 г. в акватории Тихого океана в сотне км от Петропавловска-Камчатского. Гипоцентр располагался на глубине 35 км. Несмотря на то, что в регионе крайне мало станций непрерывных ГНСС наблюдений, была предпринята попытка исследования современных движений и деформаций земной коры в условиях редкой контрольной сети, состоящей из 22 станций. Расстояния между станциями изменялись от сотен до первых тысяч км. Тем не менее, конечные элементы анализа деформаций – треугольники триангуляции Делоне покрыли область распространения сейсмического разрыва, что позволило достаточно надежно отследить пространственно-временную эволюцию движений и деформаций земной коры на интервале 5 лет перед сильнейшим событием. Эволюция деформации полного сдвига представлена на видео по ссылке <https://esdb.gcras.ru/doi/2025/esdb-kamchatka-tss-2025/esdb-kamchatka-tss-2025.mp4>.

Первое сильное землетрясение М7 произошло в феврале 2020 г. в районе о-ва Утуруп. Наиболее интересно, что с этого времени началась активизация слабых и умеренных событий, завершившаяся более мощным землетрясением с М7.5 именно там, куда через пять лет с северо-востока примкнуло южное окончание сейсмического разрыва Камчатского мегаземлетрясения М8.8. Т.е. эта «клавиша уже сыграла свою ноту», ожидая продолжения «мелодии». Далее активизация слабых и умеренных событий началась преимущественно в юго-западной части Курило-Камчатский дуги. Здесь начала устойчиво развиваться аномалия полного сдвига, начиная с $2.5 \cdot 10^{-7}$. На северо-востоке плотность эпицентров развивалась менее интенсивно. В первые годы пятилетней прелюдии эта сдвиговая аномалия продолжала расширяться. Через полтора года образовался ее экстремум на севере в районе о-ва Беринга, где примерно через год произошло землетрясение с М6 и начала развиваться северная аномалия меньшей амплитуды, чем южная. В это время в будущей эпицентральной зоне Камчатского мегаземлетрясения сохранялось деформационное «молчание». В этой зоне за год до главного события произошло сильное землетрясение М7 и его афтершоки изменили положение изолинии окраины аномальной зоны. С 20 по 29 июля в эпицентральной зоне будущего мегасобытия произошло четыре форшока с М6.6–7.4 и рой умеренных. Мегаземлетрясение объединило две аномальных области деформации воедино, не противореча гипотезе о ее триггерном воздействии на подготовленный очаг.

EVOLUTION OF SHEAR DEFORMATION OF THE EARTH'S CRUST AS A PROBABLE TRIGGER OF THE KAMCHATKA MEGATHRUST EARTHQUAKE

V. I. Kaftan*, P. A. Dokukin

Geophysical Center of the Russian academy of Sciences, Moscow, Russia

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

Continuous geodetic observations at GNSS stations located in seismically active regions have been actively used over the past decades to study recent crustal movements and deformations. Anomalous deformations are often detected, evolving in space and time in concert with the pattern of regional seismicity. Of particular interest is the study of the evolution of. The horizontal total shear strain often manifests itself as a triggering effect on a prepared seismic source. Specially created kinematic visualizations allow for tracking patterns in the seismic deformation process. Synoptic analysis of these visualizations enables the verification of various hypotheses regarding the relationship between deformations and seismic activity. The first instance of anomalous horizontal strike-slip deformation moving toward the surface of a future strong earthquake's focus was detected in connection with the Napa earthquake (August 2014, M6.0). The traveling anomaly originated at the epicenter of a pair of moderate earthquakes and moved approximately 200 km over 9 years. Similar developments of full-slip deformation have been recorded in other regions.

One of the strongest historical earthquakes M8.8 occurred on July 29, 2025. Despite the extremely limited number of continuous GNSS observation stations in the region, an attempt was made to study recent crustal movements and deformations. Nevertheless, the finite elements of deformation analysis—Delaunay triangulation triangles—covered the seismic rupture distribution, allowing for a fairly reliable tracing of the spatiotemporal evolution of crustal movements and deformations over a five-year period prior to the strongest event. The evolution of the stain is presented in the video at the link <https://esdb.gcras.ru/doi/2025/esdb-kamchatka-tss-2025/esdb-kamchatka-tss-2025.mp4>

The first strong M7 earthquake occurred in February 2020 near Uturup Island. Most interestingly, from that time onward, weak and moderate events began to intensify, culminating in a more powerful M7.5 earthquake precisely where, five years later, the southern end of the seismic rupture of the Kamchatka M8.8 megathrust earthquake would join from the northeast. In other words, this «key had already played its note», awaiting the continuation of the «melody». Subsequently, weak and moderate events began to intensify primarily in the southwestern part of the Kuril-Kamchatka arc. Here, a total strike-slip anomaly began to develop steadily, starting at $2.5 \cdot 10^{-7}$. During the first years of the five-year prelude, this strike-slip anomaly continued to expand. About a year later, an M6 earthquake occurred there, and a northern anomaly of smaller amplitude than the southern one began to develop. During this time, deformational «silence» persisted in the future epicentral zone of the Kamchatka megathrust earthquake. A year before the main event, a strong M7 earthquake occurred in this zone, and its aftershocks shifted the contour of the anomaly's margin. From July 20th to 29th, four foreshocks with magnitudes of M6.6–7.4 and a swarm of moderate ones occurred in the epicentral zone of the future mega-earthquake. The mega-earthquake merged two anomalous deformation zones, consistent with the hypothesis of its triggering effect on a pre-existing source

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕЦИФИЧЕСКИХ «ЗЕЛЕННЫХ» ТЕХНИК ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ГВИНЕЕ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Д. Кеита, М. С. Бурханов*

Высший институт горного дела и геологии Боке, Боке, Гвинея

**E-mail: mburhanov65@mail.ru*

Гвинея, богатая минеральными ресурсами, сталкивается со значительными экологическими проблемами, связанными с горнодобывающей промышленностью. В данной статье рассматриваются возможности применения конкретных «зеленых» технологий для содействия устойчивому методу добычи полезных ископаемых. Эти технологии направлены на минимизацию воздействия на окружающую среду при одновременном максимизации экономических выгод для местных сообществ.

Введение. Горнодобывающая промышленность в Гвинее имеет решающее значение для экономического развития страны. Однако традиционные методы добычи привели к значительной деградации окружающей среды, включая загрязнение почвы и воды, вырубку лесов и потерю биоразнообразия. В этом контексте внедрение «зеленых» технологий имеет важное значение для обеспечения устойчивости.

Материалы и методы. В качестве рабочих материалов для данной работы мы использовали архивы последних исследований Целей устойчивого развития (ЦУР), проводимых международными организациями, отчеты и конвенции по изменению климата, а также рамочные документы по реализации политики устойчивого горнодобывающего производства в Африке. В качестве методов составления мы применили описательный подход посредством обзорного исследования специальных «зеленых» технологий и их вклада в ответственное горнодобывающее производство. Это позволило нам обобщить передовой опыт на основе тематических исследований, запланированных для горнодобывающих проектов на определенных месторождениях в Гвинее. К ним относятся:

1. Переработка и повторное использование отходов.
2. Использование возобновляемых источников энергии.
3. Лесовосстановление и восстановление экосистем.
4. Технологии экологического мониторинга.

Результаты и обсуждение. Внедрение «зеленых» технологий для устойчивого горнодобывающего производства минеральных ресурсов в Гвинее сопряжено с рядом специфических проблем, а именно:

1. Высокие первоначальные затраты из-за значительных новых инвестиций.
2. Неадекватное регулирование может способствовать сопротивлению горнодобывающих компаний внедрению «зеленых» технологий в процессы добычи минеральных ресурсов.
3. Остаточное воздействие на окружающую среду: несмотря на внедрение экологически чистых технологий, могут сохраняться остаточные последствия, унаследованные от традиционных методов добычи полезных ископаемых, а восстановление территории может быть сложным и дорогостоящим процессом.
4. Создание эффективных систем мониторинга для оценки воздействия экологически чистых технологий может быть сложной задачей.

Заключение. Применение конкретных «зеленых» технологий в горнодобывающей промышленности Гвинеи является не только экологической необходимостью, но и экономической возможностью. Интегрируя эти методы, Гвинея может обеспечить устойчивую эксплуатацию своих минеральных ресурсов, одновременно защищая окружающую среду и улучшая качество жизни местных сообществ. Для достижения этих целей крайне важна приверженность заинтересованных сторон, включая правительство, предприятия и местные сообщества.

APPLICATION OF SPECIFIC «GREEN» TECHNIQUES FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE MINING INDUSTRY IN GUINEA: CHALLENGES AND PROSPECTS

D. Keita, M. S. Burhanov*

Higher Institute of Mining and Geology of Boke, Boke, Guinea

**E-mail: mburxanov65@mail.ru*

Guinea, rich in mineral resources, faces significant environmental challenges associated with the mining industry. This article examines the potential for applying specific green technologies to promote sustainable mining practices. These technologies aim to minimize environmental impacts while maximizing economic benefits for local communities.

Introduction. The mining industry in Guinea is crucial to the country's economic development. However, traditional mining methods have resulted in significant environmental degradation, including soil and water pollution, deforestation, and biodiversity loss. In this context, the adoption of green technologies is essential for ensuring sustainability.

Materials and methods. For the working materials for this work, we used archives of recent Sustainable Development Goal (SDG) studies conducted by international organizations, climate change reports and conventions, and framework documents for the implementation of sustainable mining policies in Africa. We used a descriptive approach to our research, conducting a scoping study of specific green technologies and their contribution to responsible mining. This allowed us to compile best practices based on case studies planned for mining projects at specific sites in Guinea. These include:

1. Waste recycling and reuse.
2. Use of renewable energy.
3. Reforestation and ecosystem restoration.
4. Environmental monitoring technologies.

Results and discussion. The implementation of green technologies for sustainable mineral resource mining in Guinea faces a number of specific challenges, namely:

1. High upfront costs due to significant new investments.
2. Inadequate regulation may contribute to mining companies' resistance to the adoption of green technologies in mineral resource extraction processes.
3. Residual environmental impacts: Despite the implementation of clean technologies, residual impacts from traditional mining practices may persist, and site restoration can be complex and costly.
4. Establishing effective monitoring systems to assess the impacts of clean technologies can be challenging.

Conclusion. The application of specific green technologies in Guinea's mining industry is not only an environmental necessity but also an economic opportunity. By integrating these methods, Guinea can ensure the sustainable exploitation of its mineral resources while protecting the environment and improving the quality of life of local communities. To achieve these goals, the commitment of stakeholders, including the government, businesses, and local communities, is essential.

ВЛИЯНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ НА СООТНОШЕНИЕ МАГНИТУД M_s И M_w КРУПНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

М. Н. Кирякова, А. Л. Стром*

Научно-исследовательский институт энергетических сооружений – филиал АО «Институт Гидропроект», Москва, Россия

*E-mail: strom.alexandr@yandex.ru

Магнитуды по поверхностным волнам (M_s , M_{LH}) широко применялись для характеристики величины землетрясений и для их сопоставления с другими очаговыми параметрами, такими как протяженность поверхностных разрывов и величина подвижки по ним. Однако в начале 70-х годов были введены понятия сейсмического момента (M_0) и моментной магнитуды (M_w) как более универсальные характеристики величины землетрясения. Было установлено, что для землетрясений умеренной величины значения M_s и M_w численно близки (в среднем, хотя и с большим разбросом), а для крупнейших землетрясений ($M > 7.5–8.0$) значения M_s насыщаются, и, соответственно, их значения M_s должны быть меньше, чем значения M_w . Однако, сопоставляя опубликованные оценки M_s (M_{LH}) и M_w современных катастрофических землетрясений, таких как Венчуанское в Китае 12.05.2008 г., или Турецких 06.02.2023 г., для которых оба значения определялись непосредственно, мы обнаружили обратные соотношения – их значения M_s были пусть незначительно (на 0.1–0.2 единицы магнитуды), но все же выше, чем соответствующие значения M_w .

Анализ опубликованных значений магнитуд для землетрясений, зарегистрированных с начала XX века и после 1960 г. показал, что у крупнейших землетрясений, произошедших вне зон субдукции или над ними, как, например, неглубокие коровые землетрясения на западном побережье Японии, значения M_s действительно часто слегка превышают значения моментной магнитуды M_w . В то же время, общемировое соотношение между этими параметрами, полученное без разделения на эти типы соответствует таковому, характерному именно для землетрясений в зонах субдукции, где зарегистрировано большинство таких землетрясений. Следует отметить, что магнитудные шкалы M_s и M_w , несмотря на сходство численных значений, характеризуют разные параметры землетрясений: M_w – всю работу, произведенную в очаге землетрясений, а M_s – энергию, излученную из очага в виде упругих колебаний. Можно предположить, что у крупнейших землетрясений, происходящих в мощной и более прочной континентальной коре, на генерацию упругих колебаний расходуется большая доля общей энергии, чем у землетрясений в зонах субдукции. С прикладной точки зрения (например, при общем сейсмическом районировании) это надо учитывать при пересчете в моментные магнитуды значений M_s крупнейших землетрясений ранне-инструментального периода, для которых были определены и опубликованы именно значения M_s (M_{LH}).

EFFECT OF THE TECTONIC SETTING ON THE RELATIONSHIPS BETWEEN M_s AND M_w FOR LARGEST EARTHQUAKES

M. N. Kiryakova*, A. L. Strom

Research institute of energy structures – branch of JSC «Hydroproject Institute», Moscow, Russia

*E-mail: strom.alexandr@yandex.ru

Surface wave magnitudes (M_s , M_{LH}) were commonly used to characterize earthquake size and to compare it with other parameters of an earthquake, such as surface rupture length and displacement. In early 70th, however, seismic moment (M_0) and moment magnitude (M_w) were introduced as the more universal characteristics of an earthquake size. It has been found that M_s and M_w values are numerically more or less similar (on average with large scatter) for the moderate-size earthquakes, while for the largest ($M > 7.5–8.0$) earthquakes M_s saturates, so that their M_s values should be lower than M_w . However, comparing published M_s (M_{LH}) and M_w estimates for modern catastrophic earthquakes, for which both values were derived directly, such as the 12.05.2008

Wenchuan earthquake in China, or the 06.02.2023 earthquakes in Turkey, we found an opposite trend – their M_s values were slightly (for 0.1–0.2 magnitude units) larger than corresponding M_w values. The analysis of published magnitude values for earthquakes recorded both since the beginning of the XXth Century and since 1960, revealed that M_s values of largest earthquakes which sources are located outside the subduction zones or just above them, like, for example, shallow crustal earthquakes at the western coast of Japan, indeed are often slightly higher than corresponding M_w values. At the same time, the global M_s – M_w relationship derived without such division is governed by the tendency typical of the subduction zones where vast majority of largest earthquakes have occur. It should be noticed that the moment magnitude and surface wave magnitude scales, despite similarity of the corresponding values, characterize different parameters of an earthquake. M_w characterizes total energy released in the earthquake source, while M_s characterizes energy radiated from the source by elastic waves. It can be assumed that for very large earthquakes that occur in thick and more rigid continental crust the portion of the total energy radiated in the form of the elastic waves is higher than for such earthquakes in the subduction zones. For practical applications (e.g. general seismic zoning), such effect should be taken into consideration when converting M_s of largest earthquakes of the early instrumental period, for which just M_s (M_{LH}) estimates had been measured and published, into M_w .

РАЗМЕРЫ ЗОН АСПЕРИТИ И ИХ СВЯЗЬ С ПРОЦЕССОМ ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

С. Б. Кишкина*, Г. Г. Кочарян

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: s-b-kish@yandex.ru*

Крупные землетрясения являются следствием динамической подвижки по тектоническому разлому. С тех пор, как Брейс и Байерли [1] предложили использовать в сейсмологии модель прерывистого скольжения, при описании фрикционного взаимодействия бортов разлома стала применяться адгезионная модель трения [2]. Этот подход, с одной стороны, интерпретирует классические законы трения Кулона–Амонтона, а с другой, опираясь на механику взаимодействия шероховатых поверхностей, дает возможность описать параметры высокочастотного движения, наблюдаемые в ближней зоне землетрясения.

Существующие на сегодняшний день представления о старте, развитии и остановке процесса скольжения при землетрясении говорят о том, что ключевую роль в механизме подготовки землетрясений играют области асперитис («*asperities*»). Этот термин закрепился за особыми участками «неровности», которые представляют собой «прочные, напряженные» пятна, окруженные областями, где напряжение частично сбрасывается в межсейсмический период. Современные подходы к модели зарождения и развития землетрясения предполагают, что эти процессы во многом определяются размерами и взаимным расположением областей асперитис, обладающих разной динамикой фрикционных характеристик материалов.

В представляемой работе были проанализированы данные более чем ста сильных землетрясений с магнитудами от $M_w 7$ до 9, для которых имеются опубликованные параметры пространственно-временного распределения косейсмического скольжения, моделирующие процесс разрыва земной коры во время землетрясения. Такие данные позволили оценить размеры зоны скольжения и амплитуды смещения вдоль разлома, провести оценку масштаба областей асперитис и получить зависимость этих величин от масштаба землетрясения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда
(проект № 22-17-00204-П).*

Литература

1. *Brace W.F., Byerlee J.D.* Stick-slip as a mechanism for earthquakes // *Science*. 1966. Vol. 153. P. 990–992.
2. *Scholz C.H.* The mechanics of earthquakes and faulting: Cambridge, Cambridge University Press, 2019. – 517 p.

ASPERITY SIZE ZONES AND PREPARATION FOR EARTHQUAKE

S. B. Kishkina*, G. G. Kocharyan

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

**E-mail: s-b-kish@yandex.ru*

Large earthquakes are the result of dynamic movement along a tectonic fault. Since Brace and Byerly proposed using the stick-slip model in seismology, the adhesive friction model has been used to describe the frictional interaction of fault sides. This approach, on the one hand, interprets the classical laws of Coulomb–Amonton friction, and on the other, based on the mechanics of interaction of rough surfaces, makes it possible to describe the parameters of high-frequency motion observed in the near earthquake zone.

The current understanding of the start, development and stopping of the sliding process during an earthquake suggests that the asperities play a key role in the mechanism of earthquake. The «*asperity*» term has become fixed for special areas of «unevenness», which are «strong, stressed» spots surrounded by areas where stress is partially relieved during the inter-seismic period. Modern approaches to the model of earthquake suggest that these processes are largely determined by the size and relative location of asperitis areas with different dynamics of the frictional characteristics of materials.

In the presented work, data from more than a hundred strong earthquakes with magnitudes from M_w 7 to 9 were analyzed, for which there are published parameters of the spatiotemporal distribution of coseismic slip, simulating the process of rupture of the Earth's crust during an earthquake. Such data made it possible to estimate the size of the slip zone and the amplitude of displacement along the fault, to assess the scale of the asperity areas and to obtain the dependence of these values on the earthquake scale.

ПРОЯВЛЕНИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ В F-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ

М. В. Клименко^{1,2,*}, К. В. Белюченко^{1,2}, Ф. С. Бессараб^{1,2}, В. В. Клименко¹, К. Г. Ратовский³

¹Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук, Калининград, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

*E-mail: maksim.klimenko@mail.ru

Интерпретация ионосферных возмущений в периоды геомагнитных бурь является наиболее важным и сложным вопросом современной физики ионосферы. Для корректного решения этого вопроса необходимо использовать как доступный набор данных наблюдений параметров термосферы и ионосферы, так и результаты численных моделей верхней атмосферы Земли. В этом докладе представлен анализ воздействия магнитных бурь на верхнюю атмосферу в зависимости от рассматриваемой широты, долготы, сезона и уровня солнечной активности. Проведен статистический анализ ионосферного отклика на геомагнитные бури с использованием данных вертикального зондирования на отдельных станциях и электронного содержания в различных широтных регионах. Анализ включает в себя идентификацию геомагнитных событий на основе индексов геомагнитной активности и расчет «эталонного» ионосферного отклика. «Эталонный» отклик представляет собой динамику среднего ионосферного возмущения, полученную методом наложенных эпох с ключевыми моментами, соответствующими максимуму геомагнитных возмущений. Ионосферное возмущение представляет собой относительное (процентное) отклонение наблюдаемых значений от 27-дневного скользящего среднего значения. Анализ показал, что амплитуда положительного возмущения заметно выше в минимуме солнечной активности, чем в максимуме, максимальна зимой и практически отсутствует летом. Приводятся результаты исследований ионосферного отклика на экстремальные геомагнитные бури. Рассмотрены основные физические процессы, которые играют важную роль в формировании ионосферных эффектов на разных фазах развития геомагнитной бури. Обсуждаются новые выявленные особенности (эффект последствия, высокоширотное увеличение электронного содержания, и т.д.) ионосферного отклика на геомагнитные бури. На основе Глобальной Самосогласованной Модели Термосферы, Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП) нами была дана интерпретация ионосферных эффектов геомагнитных бурь, как конкретных, так и «эталонных», выявлены и проанализированы положительные эффекты последствия. Анализ результатов численного моделирования показал, что положительные эффекты последствия по-разному проявляются в различных долготных секторах.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда
(проект № 26-12-00513).*

MANIFESTATIONS OF GEOMAGNETIC STORMS IN THE IONOSPHERIC F-REGION

M. V. Klimenko^{1,2,*}, K. V. Belyuchenko^{1,2}, F. S. Bessarab^{1,2}, V. V. Klimenko¹, K. G. Ratovsky³

¹West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation Russian Academy of Sciences, Kaliningrad, Russia,

²St. Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

³Institute of Solar-Terrestrial Physics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*E-mail: maksim.klimenko@mail.ru

The interpretation of ionospheric disturbances during geomagnetic storms is one of the most important and complex issues in modern ionospheric physics. To correctly address this problem, it is necessary to utilize both the available observational datasets of thermospheric and ionospheric parameters and the results of first-principle's models of the Earth's upper atmosphere. This report presents an analysis of the impact of magnetic storms on the upper atmosphere depending on latitude, longitude, season, and the level of solar

activity. A statistical analysis of the ionospheric response to geomagnetic storms has been conducted using vertical sounding data from individual stations and total electron content (TEC) measurements across various latitudinal regions. The analysis involves the identification of geomagnetic events based on geomagnetic activity indices and the calculation of a «reference» ionospheric response. The «reference» response represents the dynamics of the average ionospheric disturbance, obtained using the superposed epoch method with key moments corresponding to the maximum of geomagnetic disturbances. The ionospheric disturbance is defined as the relative (percentage) deviation of observed values from the 27-day moving average. The analysis showed that the amplitude of the positive disturbance is significantly higher during the solar activity minimum than during the maximum; it reaches its peak in winter and is practically absent in summer. The results of studies on the ionospheric response to extreme geomagnetic storms are presented. The main physical processes that play a key role in the formation of ionospheric effects at different phases of a geomagnetic storm are considered. Newly identified features (after-storm effects, high-latitude increases in electron content, etc.) of the ionospheric response to geomagnetic storms are discussed. Based on the Global Self-Consistent Model of the Thermosphere, Ionosphere, and Protonosphere (GSM TIP), we provided an interpretation of the ionospheric effects of both specific and «reference» geomagnetic storms, and identified and analyzed positive after-storm effects. Analysis of the model results showed that positive after-storm effects manifest differently in various longitudinal sectors.

ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА МОРСКИХ РЕГИОНОВ В РАЗНЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ОБСТАНОВКАХ

И. А. Клоков^{1,*}, А. А. Крылов^{1,3}, М. А. Новиков^{1,3}, Е. С. Горбатов²

¹Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Научно-технологический университет «Сириус», федеральная территория «Сириус», Россия

²Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

³Институт океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук, Москва, Россия"

*E-mail: ilia.klokov@mail.ru

Морские регионы играют ключевую роль в природно-ресурсном и экономическом развитии страны. Они характеризуются высоким уровнем концентрации важных промышленных объектов критической инфраструктуры, включая атомные электростанции, гидроэлектростанции, нефтеперерабатывающие предприятия, хранилища отходов, крупные порты с нефтеналивными терминалами, трубопроводные системы. В связи с этим вопрос точного сейсмического потенциала на долгосрочный период (до 10 тысяч лет) является довольно актуальным. Это связано, помимо необходимости обеспечения безопасности людей, еще и с особой уязвимостью водной среды к всевозможным загрязнениям, к которым могут привести даже незначительные аварии на объектах добывающей и промышленной морской инфраструктуры вследствие опасных природных явлений.

Для исследования были выбраны Восточно-Причерноморский и Кольско-Беломорский регионы, характеризующиеся различными геодинамическими процессами и сеймотектоническими обстановками. Был проанализирован большой объем палеосейсмологических данных и доступные электронные каталоги землетрясений за инструментальный период. Были составлены сводные каталоги землетрясений, включающие в себя палеоземлетрясения, исторические землетрясения и сейсмические события за инструментальный период.

Для изучаемых регионов была разработана классификация палеосейсмодислокаций, включающая нарушения в рельефе и в рыхлых отложениях, и строгие критерии выявления (общие, а также отдельно для конкретного вида деформации), позволяющие точно отделять их от аналогичных структур экзогенного происхождения, а также исключить формы рельефа, возникшие вследствие землетрясений, произошедших ранее, чем 10 тысяч лет назад. Для полученных событий были определены значения интенсивности, магнитуды, а также положение очага.

Инструментальные каталоги были очищены от дублей и унифицированы по магнитуде. Сводные каталоги были использованы для построения кумулятивных графиков повторяемости землетрясений для изучаемых регионов. Для сильнейших событий были оценены параметры сейсмических воздействий в окрестности расположения основных объектов критической инфраструктуры в регионах, опасных с точки зрения вероятных экологических загрязнений. Была также оценена вероятная повторяемость таких событий.

Исследования выполнены при финансовой поддержке, реализуемые в рамках государственной программы федеральной территории «Сириус» «Научно-технологическое развитие федеральной территории «Сириус» (Соглашение № 18-03 от 10.09.2024).

FEATURES OF THE STUDY OF THE SEISMIC POTENTIAL OF MARINE REGIONS IN DIFFERENT GEODYNAMIC SETTINGS

I. A. Klokov^{1,*}, A. A. Krylov^{1,3}, M. A. Novikov^{1,3}, E. S. Gorbato²

¹*Sirius University of Science and Technology, Sirius Federal Territory, Russia*

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

³*Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*E-mail: ilia.klokov@mail.ru

Marine regions play a key role in the country's natural resource and economic development. They are characterized by a high concentration of important industrial critical infrastructure facilities, including nuclear power plants, hydroelectric power plants, oil refineries, waste storage facilities, large ports with oil terminals, and pipeline systems. Therefore, the issue of accurately assessing the long-term seismic potential (up to 10.000 years) is quite pressing. This is due, in addition to the need to ensure human safety, to the particular vulnerability of the aquatic environment to all kinds of pollution, which can result from even minor accidents at offshore industrial infrastructure facilities due to hazardous natural phenomena.

The study focused on the Eastern Black Sea and Kola-White Sea regions, characterized by distinct geodynamic processes and seismotectonic settings. A large volume of paleoseismological data and available electronic earthquake catalogs for the instrumental period were analyzed. Consolidated earthquake catalogs were compiled, including paleoearthquakes, historical earthquakes, and seismic events for the instrumental period.

A classification of paleoseismic dislocations was developed for the studied regions, including deformations in the relief and in loose deposits. Criteria have been developed for each type of deformation. They allow for the accurate separation of these structures from similar structures of exogenous origin. The criteria also exclude landforms that were formed as a result of earthquakes that occurred more than 10.000 years ago. The intensity, magnitude, and location of the earthquake determined.

Instrumental catalogs were cleared of duplicates and unified by magnitude. The consolidated catalogs were used to construct cumulative earthquake recurrence graphs for the studied regions. For the strongest events, seismic impact parameters were estimated in the vicinity of key critical infrastructure facilities in regions hazardous in terms of potential environmental pollution. The probable recurrence of such events was also estimated.

КО-СЕЙСМИЧЕСКАЯ ФАЗА ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГЕОСРЕДЫ ПО ДАННЫМ ПРЕЦИЗИОННЫХ СКВАЖИННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Г. Н. Копылова*, С. В. Болдина

Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба» Российской академии наук, Камчатский филиал, Петропавловск-Камчатский, Россия

**E-mail: gala@emsd.ru*

Изменение напряжённо-деформированного состояния сейсмогенной области вследствие ко- и постсейсмических процессов при сильных землетрясениях может оказывать существенное влияние на сейсмическую опасность в обширных пространственных и временных диапазонах. Перспективным способом диагностики объемной деформации водовмещающих пород в течение ко-сейсмической фазы землетрясения являются скважинные наблюдения за вариациями уровня/давления подземной воды с частотой не менее 1 Гц.

Настоящий доклад посвящен изучению быстрой (ко-сейсмической) фазы изменения статического напряженного состояния геосреды методом прецизионных наблюдений в скважинах за изменениями давления подземной воды. В качестве примера рассматриваются данные измерений давления воды в скважинах ЮЗ-5 и 1303 (Восточная Камчатка) во время сейсмической активизации в июле–ноябре 2025 г., включающей мега-землетрясение с магнитудой 8.8, его фор- и афтершоки. При 16-ти землетрясениях с магнитудами $M_w = 5.7–8.8$, произошедших на расстояниях 123–295 км от скважин, были выделены ко-сейсмические скачки давления воды с амплитудами 0.2–440 гПа, соответствующие величинам объемной деформации $1.3 \cdot 10^{-9}–1.8 \cdot 10^{-6}$. Верификация полученных величин проводится путем расчетов объемной деформации в районах скважин по модели протяженного дислокационного источника с параметрами механизмов очагов землетрясений по каталогу GlobalCMT. Полученные оценки объемной ко-сейсмической деформации в диапазоне ед. $\times 10^{-9}$ –ед. $\times 10^{-6}$ находятся в соответствии с расчетными величинами в пределах одного порядка. Это позволяет использовать данные регистрации вариаций давления воды в отдельных скважинах для выделения быстрой фазы ко-сейсмического изменения статической деформации при сильных землетрясениях и получения соответствующих количественных оценок.

CO-SEISMIC PHASE OF CHANGE IN THE STRESS STATE OF A WATER-SATURATED MEDIUM ACCORDING TO PRECISION WELL OBSERVATIONS

G. N. Kopylova*, S. V. Boldina

Kamchatka branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

**E-mail: gala@emsd.ru*

Changes in the stress-strain state of a seismogenic region due to co- and post-seismic processes during strong earthquakes can have a significant impact on seismic hazard over large spatial and temporal ranges. A promising method for diagnosing volumetric deformation of water-bearing rocks during the co-seismic phase of an earthquake is well observations of variations in the level/pressure of groundwater with a frequency of at least 1 Hz.

The report is devoted to the study of the fast (co-seismic) phase of changes in the static stress state of the environment using the method of precision observations in wells of changes in groundwater pressure. As an example, we consider data from water pressure measurements in wells YuZ-5 and 1303 (Eastern Kamchatka) during seismic activity in July–November 2025, including a mega-earthquake with a magnitude of 8.8, its fore- and aftershocks. During 16 earthquakes with magnitudes $M_w = 5.7–8.8$, which occurred at distances of 123–295 km from the wells, co-seismic jumps in water pressure with amplitudes of 0.2–440 hPa were identified, corresponding to volumetric deformation values of $1.3 \cdot 10^{-9}–1.8 \cdot 10^{-6}$. Verification of the obtained values is carried out by calculating the volumetric deformation in the well areas using the extended dislocation

source model with earthquake foci parameters according to the GlobalCMT catalogue. The obtained estimates of volumetric co-seismic deformation in the range of $\text{units} \times 10^{-9}$ – $\text{units} \times 10^{-6}$ are in agreement with the calculated values within one order of magnitude. These results make it possible to use data from recording water pressure variations in individual wells to identify the rapid phase of co-seismic changes in static volumetric deformation during strong earthquakes and to obtain corresponding quantitative estimates.

ВЕРИФИКАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИОНИЗАЦИИ И РЕКОМБИНАЦИИ D-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ СДВ-НАБЛЮДЕНИЙ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

В. О. Копышова*

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: kopyshova.vo@phystech.edu*

В работе исследовалась точность прогнозирования отклика нижней ионосферы на рентгеновское излучение солнечных вспышек. В качестве базовой модели использованы коэффициенты скоростей ионизации и рекомбинации, полученные в работе [1]. Цель настоящих исследований – верификация указанных коэффициентов по независимым вспышкам 2022 г. Прежде всего, по данным GOES рассчитывались потоки рентгеновского излучения в более жестких диапазонах. Затем, используя полученные потоки рентгена во время вспышек и значения коэффициентов ионизации и рекомбинации, рассчитывалась динамика электронной концентрации на высотах 52, 56, 60 и 64 км на трассах распространения ОНЧ (3–30 кГц) сигналов. Полученные значения N_e в дальнейшем аппроксимировались двухпараметрической моделью нижней ионосферы [Wait]. Далее с использованием пакета LWPC и высотных профилей N_e проводились расчеты амплитуды и фазы ОНЧ-сигналов, распространяющихся вдоль трассы и принимаемых в геофизической обсерватории «Михнево» (54°57' с.ш., 37°46' в.д.) ИДГ РАН. Результаты расчетов сопоставлялись с результатами регистрации.

Наблюдаемое общее соответствие результатов расчета с данными эксперимента свидетельствует о работоспособности использованной схемы ионизационно-рекомбинационного цикла и корректности верифицированных коэффициентов. В то же время, расхождения между модельными и экспериментальными данными в отдельные временные интервалы указывают на необходимость дальнейшего совершенствования модели.

Литература

1. Ryakhovsky I.A., Poklad Y.V., Gavrilov B.G., Bekker S.Z. Estimation of the ionospheric D-region ionization caused by X-class solar flares based on VLF observations // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2024. Vol. 129. P. e2023JA031532. <https://doi.org/10.1029/2023JA031532>

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

VERIFICATION OF IONIZATION AND RECOMBINATION COEFFICIENTS OF THE IONOSPHERIC D-REGION USING VLF OBSERVATIONS DURING SOLAR FLARES

V. O. Kopyshova*

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

** E-mail: kopyshova.vo@phystech.edu*

The study examined the accuracy of predicting the response of the lower ionosphere to X-ray radiation from solar flares. The baseline model employed ionization and recombination rate coefficient previously obtained in the work by Ryakhovsky et al. (2024). The aim of this study was to verify these coefficient using independent flares from 2022. First, X-ray fluxes in harder wavelength ranges were calculated using data from the GOES satellites. Then, using the obtained X-ray fluxes during the flares and the values of the ionization and recombination coefficients the dynamics of electron concentration at altitudes of 52, 56, 60, and 64 km along very low frequency (VLF) (3–30 kHz) signal propagation paths were calculated. The obtained N_e values were subsequently approximated using the two-parameter model of the lower ionosphere [Wait]. Next, using the LWPC package and the altitude N_e profiles, calculations of the amplitude and phase of VLF signals propagating along the path and received at the «Miknevo» Geophysical Observatory (54°57' N, 37°46' E) were performed. The calculation results were compared with the observational data.

The observed general agreement between the calculation results and experimental data indicates the viability of the employed ionization-recombination cycle scheme and the validity of the verified coefficients. At the same time, discrepancies between the model and experimental data during certain time intervals indicate the need for further refinement of the model.

О ВОЗМОЖНОМ ТРИГГЕРЕ СИЛЬНЫХ $M \geq 6.8$ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ОДНОВРЕМЕННОМ АНОМАЛЬНОМ РАЗВИТИИ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ В 2025 г.

В. М. Костин*, О. Я. Овчаренко, Е. П. Трушкина

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкова
Российской академии наук, Москва, Россия*

**E-mail: kostin@izmiran.ru*

Рассмотрены совместно сильные землетрясения $M \geq 6.8$ и развитие ТЦ в 2025 г. Если эти события имели аналоги в другие годы, то по метеорологическим моделям глубиной до 5 суток можно было дать прогноз места и времени сильных землетрясений с достоверностью $\sim 50\%$ [1]. Прогноз нарушался в случаях резких изменений траекторий ТЦ (не предсказанных метеопрогнозами), сильной интенсификации ТЦ и при зарождении нового ТЦ. Сопоставление этих событий с гистограммами сильных землетрясений $M \geq 7.0$ в рассматриваемый день за последние 100 лет показали, что они хорошо коррелируют с прохождением Земли через метеорные потоки [2]. Было сделано предположение, что в метеорных потоках присутствуют Бозе-астероиды темной материи. Академик И. И. Ткачев с сотрудниками ИЯИ РАН развивают теорию темной материи, состоящей из гипотетических Бозе-частиц – аксионов массой порядка 10^{-5} эВ [3]. Бозе-частицы из аксионов могут со временем образовывать астероиды (аксионные звезды) размером $R \sim 100$ км и общей массой ~ 10 в степени $+14$ кг и иметь скорость $V \sim 300$ км/с. Если такие астероиды сталкиваются с кометами, то они могут их разрушить и двигаться вместе с метеорными потоками. Гравитационное воздействие таких Бозе-астероидов темной материи на Землю может вызвать резкие изменения траекторий ТЦ и сильные землетрясения.

В частности, было предсказано сильное землетрясение 9–10 ноября 2025 г., которое произошло около Японии магнитудой $M = 6.8$. Поворот ТЦ *Fung-wong* наблюдался спустя ~ 4 часа. Данный удар произошел в середине области, где развивались афтершоки после события на Фукусиме в 2011 г. Показано, что форшок 9 марта и сильнейшие удары 11–12 марта сопровождалась зарождением циклона 50Q около Бразилии и резкими изломами траектории с запаздыванием ~ 6 часов. Все это происходило при прохождении максимума Alpha Leonids. Из анализа гистограммы землетрясений $M \geq 7.0$ в мае следует ожидать, что сильное землетрясение произойдет в дни конференции 20 мая 2026 г., а сильнейшее наиболее вероятно 26 мая.

Литература

1. Kostin V.M., Ovcharenko O.Ya., Trushkina E.P. Earthquake forecast up to 5 days based on tropical cyclone weather data: Atmosphere, Ionosphere, Safety. Proceedings of IX International conference. Ed.: O. P. Borchevskina, M. G. Golubkov. Kaliningrad. Algomat. 2025. P. 44–47. https://doi.org/10.59043/978-5-6042044-9-8_44
2. Костин В.М., Овчаренко О.Я., Трушкина Е.П. О возможном триггере резкого изменения параметров тропических циклонов: Материалы 23-й международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» / Электронный сборник материалов конференции. Москва. ИКИ РАН. 2025. С. 96. <https://doi.org/10.21046/23DZZconf-2025a>
3. Levkov D.G., Panin A.G., Tkachev I.I. Gravitational Bose-Einstein condensation in the kinetic regime // Physical Review Letters. 2018. Vol. 121 (15). P. 151301. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.1513>

ON THE POSSIBLE TRIGGER OF STRONG EARTHQUAKES $M \geq 6.8$ AND THE SIMULTANEOUS ANOMALOUS DEVELOPMENT OF TROPICAL CYCLONES IN 2025

V. M. Kostin*, O. Y. Ovcharenko, E. P. Trushkina

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

**E-mail: kostin@izmiran.ru*

The strong earthquakes with a magnitude of $M \geq 6.8$ and the development of TC in 2025 have been examined together. If these events had analogs in other years, then meteorological models with a forecasting depth of up to 5 days could provide predictions for the location and timing of strong earthquakes with an accuracy of approximately 50%. The forecast was disrupted in cases of sharp changes in the trajectories of TC (not predicted by weather forecasts), significant intensification of the TC, and during the formation of a new tropical cyclone. The comparison of these events with histograms of strong earthquakes ($M_w \geq 7.0$) on the given day over the past 100 years showed that they correlate well with the Earth passing through meteor streams. It was suggested that there are Bose asteroids of dark matter present in meteor streams. Academician Tkachev and his colleagues from the Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences are developing a theory of dark matter consisting of hypothetical Bose particles – axions with a mass on the order of 10^{-5} eV. Bose particles from axions may over time form asteroids with a size of $R \sim 100$ km and a total mass of 10^{14} kg, moving at a speed of $V \sim 300$ km/s. If such asteroids collide with comets, they may destroy them and move along with the meteor streams. The gravitational influence of such dark matter Bose-asteroids on Earth could cause abrupt changes in the trajectories of TC and strong earthquakes.

In particular, a strong earthquake was predicted for November 9–10, 2025, which occurred near Japan with a magnitude of $M = 6.8$. The turning of TC Fung-wong was observed approximately 4 hours later. This strike occurred in the middle of the area where aftershocks developed following the Fukushima event in 2011. It was shown that the foreshock on March 9 and the strongest impacts on March 11–12 were accompanied by the formation of cyclone 50Q near Brazil and abrupt changes in trajectory with a delay of approximately 6 hours. All this occurred during the peak of the Alpha Leonids. Based on the analysis of the histogram of earthquakes with $M \geq 7.0$ in May, it should be expected that a strong earthquake will occur on the days of the conference, May 20, 2026, and the strongest one is most likely on May 26.

МОДЕЛЬ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-РАЗЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕН ПРИХОДА СЕЙСМИЧЕСКИХ ФАЗ НА ЗАПИСЯХ ГРУППЫ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СКВАЖИННЫХ ПРИЕМНИКОВ

Р. Д. Костолина*

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия
**E-mail: kostolina.rd@phystech.edu*

Цель. Разработать и адаптировать модель глубокого обучения с использованием вейвлет-разложения для автоматического определения времени прихода Р- и S-волн в данных высокочастотного мониторинга скважин. Эффективность модели оценивалась на основе наборов данных, полученных в ходе крупномасштабного полевого эксперимента HFTS2 (Hydraulic Fracturing Test Site 2). Эта задача имеет несколько важных особенностей, которые усложняют ее решение. Эксперимент включает множество станций, полученные данные нужно обрабатывать вместе. При этом количество станций в разных группах разное и не фиксированное, поэтому алгоритм не должен зависеть от их числа. Расположение станций тоже может сильно различаться. Данные записываются с высокой частотой и содержатся в огромном количестве файлов, поэтому традиционные методы обработки не справляются.

Модель. Модель была реализована с использованием библиотеки Pytorch. Для формирования пространства признаков использовалось логарифмическое вейвлет-преобразование исходного сигнала. Блок вейвлет-разложения (WS) формирует частотно-временное представление сигнала на основе вейвлет-декомпозиции. В качестве реализации WS была использована библиотека Kymatio. В результате применения WS каждый вектор формы сигнала из пакета записей сигналов преобразуется в двумерную матрицу характеристик. После этого применяется двумерный сверточный слой с единичным размером ядра, который линейно преобразует 3-канальное изображение каждой записи в 1-канальное изображение. Далее записи отправляются во второй модуль transformer-encoder, который реализует механизм взаимного внимания к записям группы станций. Конкретная реализация механизма самовнимания, используемого в этой работе, основана на скалярном произведении векторов записей, поэтому этот модуль, по сути, применяет маску их взаимных корреляций к векторам данных. Это позволяет осуществлять обмен информацией между всеми записями всех станций. Данные, полученные на выходе второго модуля transformer-encoder, преобразуются в линейные записи (слой «Flatten»), передаются на полносвязный слой, а затем в логистическую функцию (сигмоиду), которая сопоставляет данные на выходе полносвязного слоя с диапазоном (0, 1).

Обучение и валидация. Мы обучили модель, используя первую группу станций, пронумерованных от 1 до 14, из обучающего набора. Эта группа является самой большой, что делает ее наиболее подходящей для начального обучения. Для этой группы использовались только файлы без пропущенных значений. Всего для обучения был использован 12761 файл. На этапе валидации было использовано 3163 файла.

Результаты. Была разработана модель глубокого обучения для обнаружения Р- и S-волн на записях с группы регистрирующих станций во время микросейсмического мониторинга. Модель была обучена на основе наборов данных, полученных в ходе крупномасштабного полевого эксперимента HFTS2. Новизна предлагаемого метода заключается в использовании модели вейвлет-разложения для выделения признаков и трансформерной архитектуры. Данная архитектура хотя и не является достаточно точной, но имеет универсальность и применима к различным конфигурациям приемников, даже отличающимся от обучающих наборов, при увеличении же точности на данной архитектуре она теряет свою универсальность. Эта модель отлично справляется с основными трудностями. Ее архитектура не зависит от количества станций в группе, что позволяет работать с любыми данными, даже с теми, на которых она не обучалась. Трансформерная архитектура позволяет одновременно учитывать информацию со всех станций группы.

A WAVELET DECOMPOSITION-BASED DEEP LEARNING MODEL FOR SEISMIC PHASE ARRIVAL TIME EXTRACTION FROM HIGH-FREQUENCY BOREHOLE RECEIVER

R. D. Kostolina*

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

**E-mail: kostolina.rd@phystech.edu*

Objective. To develop and adapt a deep learning model using wavelet decomposition for automatic P- and S-wave arrival time determination in high-frequency well monitoring data. Model performance was evaluated using datasets obtained during the large-scale HFTS2 (Hydraulic Fracturing Test Site 2) field experiment. The experiment involves multiple stations that must be processed together. The number of stations in different groups varies and is not fixed, so the algorithm should not depend on their number. The station locations can also vary significantly. The data is recorded at a high frequency and is contained in a huge number of files, making traditional processing methods insufficient

Model. The model was implemented using the Pytorch library. A logarithmic wavelet transform of the original signal is used to generate the feature space. The wavelet decomposition (WS) block generates a time-frequency representation of the signal based on the wavelet decomposition. The Kymatio library was used to implement the self-attention mechanism. The WS transforms each waveform vector from a batch of signal records into a two-dimensional feature matrix. A two-dimensional convolutional layer with a unit kernel is then applied, linearly transforming the three-channel image of each record into a single-channel image. The records are then sent to the second transformer-encoder module, which implements a mutual attention mechanism for recordings from a group of stations. The specific implementation of the self-attention mechanism used in this work is based on the dot product of the record vectors, so this module essentially applies a mask of their cross-correlations to the data vectors. This enables information exchange between all records from all stations. The data obtained at the output of the second transformer-encoder module is transformed into linear records (the «Flatten» layer), passed to a fully connected layer, and then to a logistic function (sigmoid), which maps the data at the output of the fully connected layer to the range (0, 1).

Training and Validation. We trained the model using the first group of stations, numbered 1 through 14, from the training set. This group is the largest, making it most suitable for initial training. Only files without missing values were used for this group.

Results. A deep learning model was developed for detecting P- and S-waves in records from a group of recording stations during microseismic monitoring. The model was trained using datasets obtained during the large-scale field experiment HFTS2 (Hydraulic Fracture Testing Site 2). The novelty of the proposed method lies in its use of a wavelet decomposition model for feature extraction and a transformer architecture. Although not highly accurate, this architecture is versatile and applicable to various receiver configurations, even those different from the training sets. However, as accuracy increases with this architecture, its versatility decreases. This model copes well with the main challenges. Its architecture is independent of the number of stations in the group, allowing it to work with any data, even data it wasn't trained on.

ОСОБЕННОСТИ НАГРЕВА ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЫ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ НАЗЕМНЫХ УСТАНОВОК В ДИАПАЗОНАХ СРЕДНИХ И ДЛИННЫХ ВОЛН

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

¹Научно-исследовательский радиофизический институт, Нижний Новгород, Россия

²Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н. И. Лобачевского» (ННГУ), Нижний Новгород, Россия

*E-mail: zuravleva98@yandex.ru

При воздействии на ионосферу мощным модулированным по амплитуде коротковолновым излучением наблюдается генерация низкочастотного излучения на частоте модуляции. Эффективность генерации зависит, в частности, от интенсивности токовых систем в ионосфере Земли. По этой причине более значительные эффекты, по сравнению со среднеширотной ионосферой, наблюдаются в области авроральной токовой струи и могут проявляться в области экваториальной токовой струи. В данной работе приводятся результаты численного моделирования распространения в нижней ионосфере в области магнитного экватора радиоволн, излучаемых установкой из нескольких вертикальных диполей. При проведении расчётов использованы модели ионосферы, атмосферы и геомагнитного поля IRI-2020, NRLMSISE-00 и IGRF-14 соответственно. Плазма предполагается многокомпонентной, учитывается наличие электронов и нескольких сортов ионов, а также соударения между частицами. Рассчитана трансформация линейно поляризованных волн, падающих на нижнюю границу ионосферы, в волны обыкновенной и необыкновенной поляризации. Исследованы резонансные особенности необыкновенной волны в области верхнего гибридного резонанса и обыкновенной волны в области плазменного резонанса. Проанализированы зависимости показателей преломления и поляризации нормальных волн в резонансных областях от высоты и частоты. Рассчитаны зависимости компонент электрических полей нормальных волн от высоты. На основе этих расчетов получены зависимости возмущения температуры электронов в резонансных условиях от высоты и угла падения волны накачки.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWR-2026-0017).

FEATURES OF HEATING OF THE EQUATORIAL IONOSPHERE BY RADIOWAVES OF IONOSPHERIC HEATING FACILITY IN THE MF AND LF WAVE RANGE

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

¹NIRFI, Lobachevsky UNN, Nizhny Novgorod, Russia

²Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

*E-mail: zuravleva98@yandex.ru

When the ionosphere is exposed to high-power amplitude-modulated HF radiation low-frequency radiation is generated at the modulation frequency. The generation efficiency depends, in particular, on the intensity of current systems in the ionosphere. For this reason, more significant effects, compared to the mid-latitude ionosphere, are observed in the region of the auroral current jet and can may be observed in the region of the equatorial current jet.

This paper presents the results of numerical modeling of the propagation of radio waves emitted by an array of several vertical dipoles in the lower ionosphere near the magnetic equator. The IRI-2020 ionosphere, NRLMSISE-00 atmosphere and IGRF-14 geomagnetic field models are used to describe the plasma. The plasma is assumed to be multicomponent and the presence of electrons and several species of ions, as well as collisions between particles, are taken into account. The transformation of linearly polarized waves incident on the lower boundary of the ionosphere into waves of ordinary and extraordinary polarization is analyzed. The resonant properties of the extraordinary wave in the region of the upper hybrid resonance and the ordinary

wave in the region of the plasma resonance are investigated. The refractive indices and polarization indices of normal waves in resonant regions were analyzed as functions of height and frequency. The dependences of the electric field components of normal waves on height were calculated. Based on these calculations, the dependences of the electron temperature perturbation under resonant conditions on the height and angle of incidence of the pump wave were obtained.

ФОРШОКИ КАК ТРИГГЕРЫ КРУПНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ. ВЕРОЯТНЫЙ МЕХАНИЗМ ИНИЦИИРОВАНИЯ ГЛАВНОГО ТОЛЧКА

Г. Г. Кочарян*, С. Б. Кишкина

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

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

Форшоки – сейсмические события, которые происходят перед главным толчком – издавна привлекают внимание как возможные предвестники крупных землетрясений. Известно, что в подавляющем числе случаев то или иное землетрясение определяется как форшок лишь ретроспективно. В силу этого в настоящее время считается, что прогностическая ценность форшоков невелика.

Несмотря на сотни проведенных исследований, остается загадкой, какие именно процессы приводят к инициированию крупных сейсмических событий. Поскольку форшоки надежно регистрируются сейсмическими сетями, они могут служить источниками информации о физических процессах, происходящих в очаговой области на заключительной стадии подготовки крупного землетрясения. Вариации касательного напряжения в будущей области нуклеации главного толчка могут быть следствием эпизодов медленного скольжения, изменения статического поля напряжений в результате косейсмической или постсейсмической подвижки в очагах форшоков, динамического инициирования сейсмическими волнами, изменения порового давления в результате перетоков флюида.

В ходе работы были проанализированы сведения о форшоковых последовательностях некоторых крупных землетрясений, произошедших в разных тектонических условиях (от событий, инициируемых добычей углеводородов в континентальных областях, до меганадвигов в зонах субдукции); выполнены расчеты величин вариаций поля кулоновских напряжений на плоскости, соответствующей механизму главного толчка и основных форшоков; рассчитаны сдвиговые динамические напряжения и деформации в сейсмических волнах, излучаемых при подвижках в очагах сейсмических событий.

Согласно расчетам, значения динамических напряжений, возникающих в зонах гипоцентров основных форшоков и главного толчка от более ранних событий, достигают величин $\sigma_d \sim 3$ МПа. Оценки деформаций соответствуют $\epsilon \sim 10^{-4}$ отн.ед. Довольно велики и вариации кулоновских напряжений. При этом прямое динамическое воздействие на зону разлома сейсмическими колебаниями от форшоков или от удаленных крупных землетрясений весьма маловероятно ввиду очень малых амплитуд таких колебаний. В качестве вероятного механизма инициирования мы рассматриваем резкое увеличение проницаемости пород в разломной зоне. В результате воздействия сейсмических колебаний, излученных форшоками, в глубоких участках разлома с высоким избыточным давлением флюида может происходить декольматация трещин; что, в свою очередь способно привести к перетокам флюидов и к увеличению порового давления в области зарождения основного разрыва на периферии контактного пятна.

Расчеты показывают, что низкая вязкость флюида на сейсмогенных глубинах способна обеспечить необходимую величину пьезопроводности для наблюдаемых времен между последовательными толчками.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда
(проект № 22-17-00204-П).*

FORESHOCKS AS TRIGGERS OF MAJOR EARTHQUAKES. A PROBABLE MECHANISM FOR INITIATING THE MAIN SHOCK

G. G. Kocharyan*, S. B. Kishkina

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

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

Foreshocks – seismic events that occur in a short interval before the main shock – have long attracted attention as possible triggers of major earthquakes. It is known that in the vast majority of cases, an earthquake is defined as a foreshock only retrospectively. Because of this, it is currently considered that the predictive value of foreshocks is low.

Despite hundreds of studies, it remains a mystery which processes lead to the initiation of major seismic events. Since foreshocks are reliably recorded by seismic networks, they can serve as sources of information about the physical processes occurring in the focal area at the final stage of preparation for a major earthquake. Variations in tangential stress in the future of the main shock nucleation region may be the result of episodes of slow sliding, changes in the static stress field as a result of coseismic or postseismic movement in the foci of foreshocks, dynamic initiation by seismic waves, and changes in pore-pressure as a result of fluid flows

In the course of the work, information on the aftershock sequences of some large earthquakes that occurred in different tectonic conditions (from events initiated by hydrocarbon production in continental regions to mega-shifts in subduction zones) was analyzed; the values of variations in the Coulomb stress field on the plane corresponding to the mechanism of the main shock and main foreshocks were calculated; shear dynamic stresses and deformations were calculated in seismic waves emitted during movements in the foci of seismic events. According to calculations, the values of dynamic stresses occurring in the hypocenter zones of the main foreshocks and the main shock from earlier events reach values of $\sigma_d \sim 3\text{MPa}$. Strain estimates correspond to $\varepsilon \sim 10^{-4}$. Variations in Coulomb stresses are also quite large. At the same time, a direct dynamic effect on the fault zone by seismic vibrations from foreshocks or from distant large earthquakes is highly unlikely due to the very small amplitudes of such impacts.

We consider a sharp increase in rock permeability in the fault zone as a probable initiation mechanism. As a result of the impact of foreshocks seismic vibrations, crack decompression may occur in deep sections of the fault with high excess fluid pressure; this, in turn, can lead to fluid overflows and an increase in pore-pressure in the source area of the main rupture at the periphery of the asperity zone.

Calculations show that the low viscosity of the fluid at seismogenic depths is able to provide the necessary amount of piezo conductivity for the observed times between earthquake sequences.

СЕЙСМОТРИГГЕРНЫЙ ФАКТОР В ОПОЛЗНЕВЫХ И ФЛЮИДОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ В АКВАТОРИИ МОРЕЙ

А. А. Крылов *

Научно-технологический университет «Сириус», Федеральная территория Сириус, Россия

Институт океанологии имени П. П. Шишова Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: artyomkrlyv@ocean.ru*

Настоящее исследование направлено на выявление взаимосвязи сейсмичности и региональной сейсмотектоники с оползневыми и флюидодинамическими процессами в акватории ряда российских морей: море Лаптевых, Черное море, Охотское море. В работе были использованы результаты наземных и донных сейсмологических наблюдений, а также доступные данные геофизических и гидроакустических исследований, полученные в ряде морских экспедиционных работ.

Были составлены базы данных и web-сервисы с интерактивным картографическим представлением, которые включают в себя следующую информацию: положение очагов землетрясений, геометрия крупных тектонических структур и известных активных разломных зон, батиметрические модели исследуемых акваторий, положение скоплений оползневых тел и областей повышенной оползнеопасности, провинций газовых сипов (т.е. мест активного выделения пузырькового газа с морского дна в водную толщу и далее в атмосферу) и грязевых вулканов.

Анализ взаимного пространственного расположения вышеперечисленных объектов позволяет сделать вывод о том, что крупнейшие провинции газовых сипов располагаются в наиболее тектонически активных зонах. Это, видимо, связано с повышенной проницаемостью геологической среды, повышенным тепловым потоком и возможным сейсмотриггерным механизмом регуляции потоков геофлюидов. Области повышенной оползнеопасности и концентрации оползневых тел, в основном, приурочены к континентальным склонам, которые характеризуются, с одной стороны, наличием большого объема накопленного газонасыщенного осадочного материала, а с другой – наличием активных разломных зон, маркирующих переход от континентальной коры к океанической или субокеанической. Эти факторы могут служить триггерами образования подводных оползней.

Результаты по морю Лаптевых получены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-17-00125-П). Результаты по Черному морю получены в рамках государственной программы федеральной территории «Сириус» «Научно-технологическое развитие федеральной территории «Сириус» (Соглашение № 18-03 от 10.09.2024).

SEISMOTRIGGER FACTOR IN LANDSLIDE AND GEOFLUID DYNAMIC PROCESSES IN SEAS

A. A. Krylov*

Sirius University of Science and Technology, Sirius Federal Territory, Russia

Shirshov Institute of Oceanology of Russian academy of sciences, Moscow, Russia

**E-mail: artyomkrlyv@ocean.ru*

The present study is aimed at identifying the relationship of seismicity and regional seismotectonics with landslide and geofluid dynamic processes in the waters of a number of Russian seas: the Laptev Sea, the Black Sea, and the Sea of Okhotsk. The work used the results of on-land and seabed seismological observations, as well as available data from geophysical and hydroacoustic studies obtained in a number of marine scientific cruises.

Databases and web services with interactive cartographic representation have been compiled, which include the following information: the position of earthquake foci, the geometry of large tectonic structures and known active fault zones, bathymetric models of the studied water areas, the position of landslide accumulations and areas of increased landslide risk, provinces of gas seeps (i.e., places of active release of bubbly gas from the seabed to the water column and further to the atmosphere) and mud volcanoes. An analysis of the relative

spatial distribution of the above-mentioned objects allows us to conclude that the largest provinces of gas seeps are located in the most tectonically active zones. This is probably due to the increased permeability of the geological environment, increased heat flow, and a possible seismotriggger mechanism for regulating geofluid flows. Areas of increased landslide risk and concentration of landslide bodies are mainly confined to continental slopes, which are characterized, on the one hand, by the presence of a large volume of accumulated gas-saturated sedimentary material, and, on the other hand, by the presence of active fault zones marking the transition from the continental crust to oceanic or suboceanic – these factors can serve as triggers for the formation of underwater landslides.

ЕСТЕСТВЕННАЯ ДЕЛИМОСТЬ ГОРНО-ПОРОДНЫХ МАСС: СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКИЙ АСПЕКТ (В РАЗВИТИЕ ИДЕЙ АКАДЕМИКА М. А. САДОВСКОГО)

М. Г. Леонов*

Геологический институт Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: mgleonov@yandex.ru

Основой доклада является лекция, прочитанная на IX Всероссийской молодежной школе-семинаре «Современная тектонофизика. Методы и результаты» (ИФЗ РАН, Москва, 2025 г.). Явление фрагментации и механизмов разрушения горных пород стали предметом пристального внимания с середины XX века. Принципиально значимый вклад в разработку этого направления геомеханики внес советский и российский геофизик М. А. Садовский, создавший учение о блоковой делимости («кусковатости») пород и породных сообществ, слагающих земную кору. Было установлено, что существуют «преимущественные» размеры отдельностей, возникающих при механической дезинтеграции горных пород и их сообществ, т.е. «естественная кусковатость» горных пород. Размеры «фрагментов» детерминированы, а размерность делимости иерархична от нано- до мегамасштабного уровня. Позже было показано, что делимость земной коры находит отражение в особенностях рельефа, тектонической структуре, распределении геофизических полей; фрагментированность горных масс иерархична и свойственна как всей верхней оболочке Земли, так и ее отдельным сегментам и структурам. При этом установлено наличие постоянного шага между структурами одного ранга, что отражает некоторые общие закономерности деструкции земной коры. Парадигма «кусковатости» нашла подтверждение в обнаружении скрытой делимости горных пород – явления, имеющего большое значение для понимания механизма структурирования. Выяснилось, что кроме кусковатости, которая находит отражение в тектонической структуре породных масс и в их механической дезинтеграции, существует «первичная кусковатость» (агрегативность, фрустумация (от лат. *frustum* – кусок) или скрытая (латентная) текстура горных пород

Идея кусковатости оказала огромное влияние на различные аспекты геологии и смежных наук: тектонофизику, мезомеханику, механику разломов, теорию и практику фрактальной геометрии. Однако при решении задач региональной геологии явлению фрагментированности (делимости, дискретности) горных масс внимание уделяется явно недостаточно. Это касается, прежде всего, выявления естественной делимости пород при структурно-геологических исследованиях, геокартировании и геоисторических обобщениях. В настоящее время практически вся трещинно-разломная тектоника рассматривается как результат действия тектонических сил и напряжений. Тем не менее, наблюдения показывают, что в ряде случаев (по-видимому, не редких) структурно-тектоническая делимость является производной от «первичной» естественной делимости горно-породных масс. Наблюдаемая в современной структуре делимость может быть выражена не только в разном масштабе, но и иметь различную природу, что необходимо учитывать при проведении геологических исследований.

Проблемы делимости горных пород как правило касаются трещинно-разломной тектоники, что, учитывая распространенность и выраженность разломов в структуре земной коры, вполне естественно. В то же время, даже беглый взгляд на морфоструктуру земной поверхности или на ее геологическое строение позволяет понять, что делимость определяется не только линейными структурами (разломами, линеаментами, зонами концентрированной деформации), но и существованием трехмерных геологических провинций, имеющих различное структурно-вещественное наполнение и длительность существования. Такие провинции являются отражением не только трехмерной (3D) геометрии, но и определяют временной аспект формирования структуры земной коры, что полностью соответствует сущности геологических процессов, протекающих во времени.

Главные выводы: (а) естественная делимость – фундаментальное свойство горнопородных масс земной коры; (б) естественная делимость не является деформацией, но во многих случаях регламентирует пространственную конфигурацию и расположение тектонических структур и форм рельефа земной поверхности; (в) естественная фрагментация проявлена не только в трехмерном

(геометрическом) пространстве, но и во временном континууме; (г) при проведении структурно-тектонических и геосторических реконструкций любого ранга необходимо учитывать «первичность» естественной делимости и вероятную «вторичность» делимости морфоструктурной и тектонической.

Исследование выполнено по Теме Геологического института РАН.

NATURAL DIVISIBILITY OF ROCK MASSES: STRUCTURAL AND TECTONIC ASPECT (IN DEVELOPMENT OF THE IDEAS OF ACADEMICIAN M. A. SADOVSKY)

M. G. Leonov*

Geological institute of RAS, Moscow, Russia

**E-mail: mgleonov@yandex.ru*

The phenomenon of fragmentation and rock failure mechanisms has been the subject of close attention since the mid-20th century. Academician M. A. Sadovsky made a significant contribution to the development of this area of geomechanics by creating the theory of block divisibility («lumpiness») of rocks and rock communities that make up the Earth's crust. It was established that the size of «fragments» is deterministic, and the divisibility dimension is hierarchical, ranging from nano- to mega-scale levels. It has been shown that the divisibility of the Earth's crust is reflected in the relief, tectonic structure, and distribution of geophysical fields; the fragmentation of rock masses is characteristic of both the entire upper shell of the Earth and its individual segments and structures. The presence of a constant step between structures of the same rank has been established, which reflects the general patterns of destruction of the Earth's crust.

The «lumpy» paradigm has been confirmed by the discovery of hidden divisibility in rocks. It has been found that in addition to the fragmentation, which is reflected in the tectonic structure of rock masses, there is a «primary fragmentation» or hidden (latent) rock texture. The idea of fragmentation has influenced various aspects of geology and related sciences, but the phenomenon of fragmentation of rock masses has received insufficient attention in regional geology. Currently, almost all fractured-fault tectonics are considered to be the result of tectonic forces and stresses. Nevertheless, observations show that it is not uncommon for structural and tectonic divisibility to be derived from the «primary» natural divisibility of rock masses. The problems of rock divisibility are usually related to fractured and faulted tectonics, which is quite natural given the prevalence and severity of faults in the Earth's crust. At the same time, divisibility is determined not only by linear structures (faults, lineaments, and zones of concentrated deformation), but also by the existence of three-dimensional geological provinces, which reflect not only three-dimensional (3D) geometry, but also determine the temporal aspect of the formation of the Earth's crustal structure. The main conclusions are as follows: (a) natural divisibility is a fundamental property of the rock masses of the Earth's crust; (b) natural divisibility is not a deformation, but in many cases it regulates the spatial configuration and arrangement of tectonic structures and landforms on the Earth's surface; (c) natural fragmentation is manifested not only in three-dimensional (geometric) space but also in the temporal continuum; (g) When conducting structural-tectonic and geohistorical reconstructions of any rank, it is necessary to take into account the «primacy» of natural divisibility and the probable «secondary» divisibility of morphostructural and tectonic divisibility.

ИЗМЕНЕНИЕ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ СМЕЩЕНИЙ ПО ПЕРЕСЕКАЮЩИМСЯ РАЗЛОМАМ

А. С. Лермонтова*

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

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

При восстановлении поля напряжений по геологическим индикаторам и наличии сложной системы сдвиговых разломов изменение поля напряжений в зонах пересечения разломов, как правило, постулируется конкретным образом. А именно, предполагается, что те сектора, в створ которых попадает ось максимального горизонтального сжатия, являются секторами сжатия, а секторами растяжения – оставшиеся [1]. Такое расположение секторов сжатия и растяжения интуитивно кажется очевидным, так как зона пересечения разломов воспринимается как некоторая неподвижная область.

Однако математическое моделирование поля напряжений, произведённое приближённым аналитическим методом [2] показывает, что в каких секторах возрастёт сжатие, а в каких оно понизится, зависит не от направления главных осей поля напряжений, а от распределения величин смещения на протяжении каждого разлома. В частности, принципиальной является величина смещения непосредственно вблизи пересечения: если пересечение является запертой точкой для каждого из разломов, то секторами сжатия будут именно те, в створ которых смотрит ось максимального горизонтального сжатия, а секторами растяжения – противоположные сектора. При этом картина меняется на обратную, если смещение на каждом разломе в месте пересечения близко к максимальному. Это связано с перераспределением всестороннего сжатия вдоль каждого смещающегося борта каждого из разломов, которое качественно наглядно видно из расчёта поля напряжений для одиночной трещины [3].

Если же зона пересечения является неподвижной зоной для одного или для обоих разломов, то вклад в изменение поля напряжений каждого из подвижных сегментов будет таким, как если бы сегмент был самостоятельным разломом, что влияет на распределение секторов сжатия и растяжения всей системы.

Литература

1. Сим Л.А., Постников А.В., Постникова О.В., Пошибаев В.В. Влияние новейшей геодинамики на газоносность Иркенеево-Чадобецкого рифтогенного прогиба // Экспозиция Нефть Газ. 2016. Т. 6. № 52. С. 8–12.
2. Лермонтова А.С., Ребецкий Ю.Л. Исследование взаимодействия трещин сдвига на основе приближенного аналитического решения задачи теории упругости // Геодинамика и тектонофизика. 2012. Т. 3. № 3. С. 239–274. <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2012-3-3-0073>
3. Осокина Д.Н., Фридман В.Н. Исследование закономерностей строения поля напряжений в окрестностях сдвигового разрыва с трением между берегами: Поля напряжений и деформаций в земной коре. М. : Наука. 1987. С. 74–119.

CHANGES OF STRESS FIELD DUE TO DISPLACEMENTS ALONG INTERSECTING FAULTS

A. S. Lermontova*

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

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

When restoring the stress field by geological indicators and the presence of a complex system of shear faults, the change in the stress field in the intersection zones of faults is usually postulated in a specific way. Namely, it is assumed that those sectors in which the axis of maximum horizontal compression falls into the frame are the compression sectors, and the remaining sectors are the tension sectors. This arrangement of compression and tension sectors seems intuitively obvious, since the intersection zone of faults is perceived as some fixed area

However, mathematical modeling of the stress field, made by the approximate analytical method, shows that the fact in which sectors the compression will increase and in which it will decrease, does not depend on the direction of the main axes of the stress field, but on the distribution of the displacement values along each fault. In particular, the displacement value is of principle importance immediately near the intersection: if the intersection is a locked point for each of the faults, then the compression sectors will be exactly those in which the axis of the maximum horizontal compression looks, and the stretching sectors will be the opposite sectors. At the same time, the picture changes to the opposite one if the displacement on each fault at the intersection point is close to the maximum. This is due to the redistribution of the всестороннего сжатия along each shifting side of each of the faults, which can be qualitatively seen from the calculation of the stress field for a single crack.

If the intersection zone is a fixed zone for one or both of the faults, then the contribution to the change in the stress field of each of the moving segments will be the same as if the segment were a separate fault, which affects the distribution of compression and extension sectors in the entire system.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК НА СКОРОСТЬ ИОНИЗАЦИИ В ВЕРХНИХ СЛОЯХ ИОНОСФЕРЫ

В. С. Лобанова*, И. А. Ряховский, Ю. А. Корсунская, Ю. В. Поклад, А. И. Сапунова

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

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

Солнечные вспышки приводят к резкому возрастанию электронной концентрации в ионосфере, что, в свою очередь, значительно влияет на распространение радиоволн, в частности, приводит к искажениям и потерям сигналов систем связи и навигации. В настоящей работе исследуется влияние электромагнитного излучения Солнца во время солнечных вспышек на динамику состояния верхних слоев атмосферы Земли – применимость теоретических и экспериментальных методов ее оценки. В работе описан подход к оценке скорости образования электронов в верхних слоях атмосферы с помощью данных моделей ионизирующего излучения Солнца (FISM2), концентрации нейтральных компонент атмосферы (NRLMSISE) и электронной концентрации (IRI-2020). Оценки проведены на примере двух вспышек X класса, зарегистрированных 06.09.2017 г. для трех основных компонент атмосферы: молекулярного и атомарного кислорода и молекулярного азота. В ходе работы была оценена оптическая толщина ионосферы, построены высотные профили эффективного коэффициента рекомбинации и скорости ионизации. Результаты верифицированы с использованием данных глобальной навигационной спутниковой системы (GPS) о полном электронном содержании (ПЭС), собранных в среднеширотной геофизической обсерватории «Михнево». С помощью исторических данных оценено приращение вертикального ПЭС, вызванного вспышками на Солнце. Показана хорошая согласованность теоретических и экспериментальных оценок: совместное использование эмпирических моделей FISM2 и NRLMSISE позволило качественно предсказать временную динамику приращения скорости ионизации на фронте солнечных вспышек. Полученные результаты могут быть применены при разработке и коррекции работы технических систем, в частности, систем навигации и связи.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900175-6). Данные были получены с использованием уникальной научной установки «Среднеширотный комплекс геофизических наблюдений «Михнево» (ИДГ РАН).

ASSESSING THE IMPACT OF SOLAR FLARES ON THE IONIZATION RATE IN THE UPPER ATMOSPHERE

V. S. Lobanova*, I. A. Ryakhovsky, Yu. A. Korsunskaya, Yu. V. Poklad, A. I. Sapunova

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

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

Solar flares cause a sharp increase in the electron density in the ionosphere, which, in turn, significantly affects the propagation of radio waves, in particular, leading to distortions and losses of communication and navigation signals. This paper examines the influence of solar electromagnetic radiation during solar flares on the dynamics of the Earth's upper atmosphere, in particular the applicability of theoretical and experimental methods for its assessment. The paper describes an approach to estimating the rate of electron production in the upper atmosphere using data from the ionizing radiation model of the Sun (FISM2), the concentration of neutral components in the atmosphere (NRLMSISE), and the electron density (IRI-2020). The assessments are based on two class X flares recorded on September 6, 2017, for three main atmospheric components: molecular and atomic oxygen and molecular nitrogen. In the course of the study, the optical thickness of the ionosphere was estimated, and altitude profiles of the effective recombination coefficient and ionization rate were constructed. The results were verified using Global Positioning System (GPS) total electron content (TEC) data collected at the Mikhnevo mid-latitude geophysical observatory. Using historical data, the vertical

TEC increment caused by solar flares was estimated. Good agreement between theoretical and experimental estimates was demonstrated: the combined use of the FISM2 and NRLMSISE empirical models allowed for a qualitative prediction of the temporal dynamics of ionization rate increments at the solar flare front. The obtained results can be applied in the development and adjustment of technical systems, particularly navigation and communication systems.

СУБДУКЦИОННО-КОНВЕКТИВНАЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ХРЕБТА ГАККЕЛЯ И ЛАПТЕВОМОРСКОЙ РИФТОВОЙ СИСТЕМЫ

Л. И. Лобковский^{1, *}, А. А. Баранов², А. А. Крылов¹, И. А. Гарагаш²

¹Институт океанологии имени П. П. Шишова Российской академии наук, Москва, Россия

²Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: llobkovsky@ocean.ru

Рассматривается субдукционно-конвективная геодинамическая модель формирования структур Восточной Арктики, основанная на данных сейсмической томографии мантии Земли и данных региональной геологии и тектоники. Ранее эта модель (в двумерной постановке) была применена для описания на качественном уровне меловой и кайнозойской эволюции литосферы Арктики и вошла в заявку России на расширение Арктического шельфа в ООН, которая была принята, а российский шельф расширен. Конвективная ячейка в верхней мантии под Восточной Арктикой в кайнозое определяла и сейчас определяет эволюцию ее структур, в частности, хребта Гаккеля. В настоящей работе мы применяем более сложную численную 3D модель конвекции в мантии с переменной вязкостью и плитной реологией на поверхности, основанную на глобальной модели сейсмической томографии SMEAN 2.

Структура ячейки под Восточной Арктикой в настоящее время определяется следующими факторами. Тихоокеанская плита движется на северо-запад и далее погружается в мантию под Северо-Американскую плиту в Алеутской зоне субдукции. При этом субдукция наклонена на север под Северо-Американскую плиту. Вещество движется в верхней мантии субгоризонтально и далее поднимается к поверхности уже за Чукоткой в бассейне СЛО. Подъем вещества в области центральной Арктики вызван также восходящими мантийными течениями в низах верхней мантии, которые затем выполаживаются на поверхности, двигаясь от Северного полюса в сторону Алеутской субдукции, таким образом, замыкая эту конвекционную ячейку.

Под действием возвратного верхнемантийного потока возникают рассеянные деформации арктической литосферы, обусловленные вязким сцеплением с подлитосферными течениями. Хребет Гаккеля с медленным спредингом также является проявлением этой конвекционной ячейки на поверхности. Периодический вулканизм в хребте Гаккеля может быть объяснён поднятием вещества тихоокеанской литосферы и (или) вещества Арктического плюма в восходящей части конвекционной ячейки. В позднем мелу, раннем кайнозое, тихоокеанская плита двигалась почти строго на север, поэтому скорости погружения вещества в Алеутской зоне и спрединга в хребте Гаккеля были существенно выше. Погружение в мантию и исчезновение на поверхности океанической плиты Кула около 50 млн. лет назад резко изменили кинематику тихоокеанской плиты, изменив ее движение с северного на северо-западное направление. Угол изменения движения тихоокеанской плиты хорошо виден в настоящее время между цепочкой подводных Императорских гор и цепью более молодых Гавайских островов.

В силу изменения направления движения тихоокеанской плиты, скорости погружения вещества на север в Алеутской зоне субдукции уменьшились, что вызвало также уменьшение скорости спрединга в хребте Гаккеля. Западный вектор движения тихоокеанской плиты вызывает постепенное смещение восходящего возвратного мантийного потока под северный край Евразии, вызывая процессы растяжения и утонения в ее литосфере в море Лаптевых.

GEODYNAMIC MODEL OF THE GAKKEL RIDGE AND THE LAPTEV SEA RIFT SYSTEM

L. I. Lobkovsky^{1, *}, A. A. Baranov², A. A. Krylov¹, I. A. Garagash²

¹*Shirshov Institute of Oceanology of Russian academy of sciences, Moscow, Russia*

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

*E-mail: llobkovsky@ocean.ru

A subduction-convection geodynamic model for the formation of Eastern Arctic structures is considered, based on seismic tomography data from the Earth's mantle and regional geology and tectonics. This model (in a two-dimensional formulation) was previously applied to qualitatively describe the Cretaceous and Cenozoic evolution of the Arctic lithosphere and was included in Russia's application to the UN for an expanded Arctic shelf, which was accepted, and the Russian shelf was expanded. A convection cell in the upper mantle beneath the Eastern Arctic has determined and continues to determine the evolution of its structures in the Cenozoic, particularly the Gakkel Ridge. In this paper, we apply a more complex numerical 3D model of mantle convection with variable viscosity and plate rheology at the surface, based on the SMEAN 2 global seismic tomography model.

The structure of the convective cell beneath the Eastern Arctic is currently determined by the following factors. The Pacific Plate is moving northwest and then subducting into the mantle beneath the North American Plate in the Aleutian subduction zone. The subduction zone is tilted northward beneath the North American Plate. Material moves subhorizontally within the upper mantle and then rises to the surface beyond Chukotka in the Arctic Ocean basin. The upwelling of material in the central Arctic is also caused by ascending mantle currents in the lower upper mantle, which then flatten out at the surface as they move from the North Pole toward the Aleutian subduction zone, thus closing this convection cell.

The return flow of upper mantle causes diffuse deformations in the Arctic lithosphere, caused by viscous coupling with sublithospheric currents. The Gakkel Ridge, with its slow spreading, is also a surface manifestation of this convection cell. Periodic volcanism in the Gakkel Ridge can be explained by the upwelling of Pacific lithosphere material and/or Arctic plume material in the ascending portion of the convection cell. In the Late Cretaceous to Early Cenozoic, the Pacific Plate moved almost due north, so the rates of subsidence in the Aleutian zone and spreading in the Gakkel Ridge were significantly higher. The subsidence of the Kula oceanic plate into the mantle and its disappearance from the surface approximately 50 million years ago dramatically altered the kinematics of the Pacific Plate, shifting its motion from north to northwest. The angle of change in the movement of the Pacific Plate is clearly visible at present between the chain of underwater Emperor Seamounts and the chain of younger Hawaiian Islands.

Due to a change in the direction of the Pacific Plate's movement, the rate of northward subduction in the Aleutian subduction zone decreased, which also caused a decrease in spreading rates in the Gakkel Ridge. The westward movement of the Pacific Plate causes a gradual shift of the ascending return mantle flow beneath the northern edge of Eurasia, triggering stretching and thinning processes in its lithosphere in the Laptev Sea.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И НАПРЯЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНОЙ ГЛОБАЛЬНОЙ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЗЕМЛИ

Л. И. Лобковский^{1,*}, А. А. Баранов², А. М. Бобров³, Ю. В. Габсатаров¹, А. В. Чуваев⁴

¹Институт океанологии имени П. П. Ширшова Российской академии наук, Москва, Россия

²Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук, Москва, Россия

³Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

⁴Российский технологический университет (РТУ МИРЭА), Москва, Россия

*E-mail: llobkovsky@ocean.ru

Рассматривается численное моделирование глобальных процессов и построение трехмерной модели Земли. Мантийная конвекция моделируется в приближении Буссинеска в трехмерной сферической геометрии. Численно решаются безразмерные уравнения сохранения массы вещества и момента импульса. В качестве исходных данных для современной модели Земли авторами используется модель сейсмической томографии SMEAN 2, которая содержит вариации поперечных сейсмических скоростей во всем объеме мантии. Вариации сейсмических скоростей в мантии пересчитываются в вариации плотности вещества. В модели неньютоновский закон вязкости, зависящий от полной температуры и глубины. Подробно численное моделирование описано в работе [5]. Введение такой реологии является ключевым моментом для получения правильной кинематики плит на поверхности Земли. В результате возникает несколько глобальных конвекционных ячеек, ответственных за общую геодинамику, а также верхнемантийные течения, связанные с общей системой литосферных плит, срединно-океанических хребтов, зон субдукции и коллизии.

На поверхности сферической модели за счет тепловой конвекции вкупе с неньютоновской реологией получена самосогласованная модель современной Земли. Тихоокеанская океаническая плита движется как одно целое в северо-западном направлении со скоростью несколько сантиметров в год. Африканская плита движется как одно целое на северо-восток. Евразийская плита в целом движется на восток, причем скорости внутри нее меняют направление, что показывает относительно большую величину деформаций внутри этой плиты. Скорости также существенно меняют направления для северо-восточной Азии, что подтверждает концепцию деформируемых плит и отсутствие четких границ для ряда плит [3]. Величины и направления рассчитанных скоростей на поверхности коррелируют с моделью кинематики плит NNR-MORVEL56 [2] и с данными космической геодезии [1, 4]. Рассчитанные напряжения на поверхности показывают общее сжатие для Кавказского региона, тогда как для восточной Арктики и в том числе для моря Лаптевых характерно в основном растяжение.

Суммарный момент импульса по всей мантии и по поверхности Земли равен нулю, что показывает отсутствие ускорения и сбалансированность сил. Полученная модель может быть использована как альтернативная NNR-MORVEL56 и ITRF система отсчета для измерения скоростей на поверхности Земли.

Литература

1. Altamimi Z., Rebischung P., Collilieux X. et al. ITRF2020: an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions // Journal of Geodesy. 2023. Vol. 97 (I. 47). P. 1–22.
2. Argus D.F., Gordon R.G., DeMets C. Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2011. Vol. 12 (11).
3. Лобковский Л.И. Тектоника деформируемых литосферных плит и модель региональной геодинамики применительно к Арктике и Северо-Восточной Азии // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 3.С. 476–495.
4. Мельник Г.Э., Стеблов Г.М. Стабильность Северной Евразии по данным спутниковой геодезии // Физика Земли. 2024. № 2. С. 3–15.
5. Чуваев А.В., Баранов А.А., Бобров А.М. Численное моделирование конвекции в мантии Земли с использованием облачных технологий // Вычислительные технологии. 2020. Т. 25. № 2. С. 103–117.

MODELING OF EARTH SURFACE MOVEMENTS AND STRESSES BASED ON A 3D GLOBAL GEODYNAMIC MODEL OF THE EARTH

L. I. Lobkovsky^{1,*}, A. A. Baranov², A. M. Bobrov³, Yu. V. Gabsatarov¹, A. V. Chuvaev⁴

¹*Shirshov Institute of Oceanology of Russian academy of sciences, Moscow, Russia*

²*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of Russian academy of sciences, Moscow, Russia*

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

⁴*Russian Technological University (RTU MIREA), Moscow, Russia*

*E-mail: llobkovsky@ocean.ru

This paper examines numerical modeling of global processes and the construction of a three-dimensional model of the Earth. Mantle convection is modeled using the Boussinesq approximation in three-dimensional spherical geometry. Dimensionless equations for conservation of mass and angular momentum are solved numerically. The authors use the SMEAN 2 seismic tomography model, which contains V_s variations throughout the mantle, as input data for a modern Earth model. Variations in seismic velocities in the mantle are converted into variations in the density of the material. The model uses a non-Newtonian viscosity law, which depends on the total temperature and depth. The numerical modeling is described in detail in. Such rheology is a key to obtaining the correct plate kinematics on the Earth's surface. As a result, several global convection cells responsible for the general geodynamics, as well as upper mantle currents associated with the general system of lithospheric plates, mid-ocean ridges, subduction and collision zones, arise.

A self-consistent model of the modern Earth was obtained on the surface of a spherical model using thermal convection coupled with non-Newtonian rheology. The Pacific Oceanic Plate moves as a unit in a northwesterly direction at a rate of several centimeters per year. The African Plate moves as a unit to the northeast. The Eurasian Plate as a whole moves eastward, with the velocities within it changing direction, indicating a relatively large magnitude of deformation within this plate. Velocities also change direction significantly for northeast Asia, confirming the concept of deformable plates and the absence of clear boundaries for a number of plates. The magnitudes and directions of the calculated velocities on the surface correlate with the NNR-MORVEL56 plate kinematics model and with space geodesy data. The calculated surface stresses indicate overall compression for the Caucasus region, while the eastern Arctic, including the Laptev Sea, is characterized primarily by extension.

The total angular momentum throughout the mantle and the Earth's surface is zero, indicating the absence of acceleration and a balanced force. The resulting model can be used as an alternative to the NNR-MORVEL56 and ITRF reference systems for measuring velocities at the Earth's surface.

АНИЗОТРОПИЯ ПОРОУПРУГОГО ОТКЛИКА ТРЕЩИНОВАТЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

Д. В. Ложкин^{1, *}, И. А. Пантелеев¹, Vladimir Lyakhovsky²

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия

²Геологическая служба Израиля, Иерусалим, Израиль

*E-mail: lozhkin.d@icmm.ru

Колебания порового давления, вызванные прохождением сейсмических волн, являются одним из широко наблюдаемых сейсмогидрогеодинамических эффектов. Классическая линейная пороупругая модель Био, базирующаяся на недренированном приближении, связывает изменение порового давления только с изменением среднего напряжения и объемной деформацией твердого скелета. Поэтому данный подход адекватно описывает пороупругий отклик флюидонасыщенного коллектора при прохождении продольных волн, но не позволяет описать отклик трещиноватых коллекторов на прохождение поперечных сейсмических волн. Особенность пороупругого отклика трещиноватого коллектора обусловлена структурной анизотропией его физических свойств: сдвиговые деформации на фронте сейсмической волны инициируют раскрытие микротрещин, приводя к изменению объемной деформации, что в свою очередь приводит к изменению порового давления флюида. В настоящей работе на основе модифицированного уравнения Скемптона изучаются закономерности пороупругого отклика флюидонасыщенной трещиноватой среды на прохождение поперечных сейсмических волн. Дополнительным фактором, определяющим чувствительность трещиноватой среды к внешнему сейсмическому воздействию, становится угол поляризации поперечной волны. В целом, чувствительность трещиноватого коллектора на прохождение сейсмических волн и, как следствие, выраженность сейсмогидродинамического эффекта определяется взаимной ориентацией вектора прихода волны (задается азимутом и углом погружения), направлением сдвига в волне (задается углом поляризации) и ориентацией трещиноватости. В результате проведенных исследований определены условия для реализации максимального и нулевого пороупругого отклика коллектора.

Практическая значимость проведенных исследований заключается в расширении диагностического потенциала сейсмогидродинамического мониторинга в сейсмоактивных районах. Совместный анализ параметров волнового поля и вариаций давления в измерительных скважинах позволяет также реконструировать ориентировку трещиноватости и оценивать степень нарушенности коллектора.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда
(проект № НФ 26-97-20006).*

ANISOTROPY OF THE POROELASTIC RESPONSE OF FRACTURED RESERVOIRS UNDER THE INFLUENCE OF TRANSVERSE SEISMIC WAVES

D. V. Lozhkin^{1, *}, I. A. Panteleev¹, V. Lyakhovsky²

¹Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

²Geological Survey of Israel, Jerusalem, Israel

*E-mail: lozhkin.d@icmm.ru

Fluctuations in pore pressure caused by the passage of seismic waves are one of the most commonly observed seismo-hydro-geodynamic effects. The classical linear pore-elastic model of Biot, based on the undrained approximation, relates changes in pore pressure solely to changes in average stress and volumetric deformation of the solid skeleton. Therefore, this approach adequately describes the pore-elastic response of a fluid-saturated reservoir to the passage of longitudinal waves, but does not allow for the description of the response of fractured reservoirs to the passage of transverse seismic waves. The peculiarity of the pore-elastic response of a fractured reservoir is due to the structural anisotropy of its physical properties:

shear deformations at the seismic wave front initiate the opening of microfractures, leading to a change in volumetric deformation, which in turn leads to a change in the pore fluid pressure. In this work, based on the modified Skempton equation, the patterns of the pore-elastic response of a fluid-saturated fractured medium to the passage of transverse seismic waves are investigated. An additional factor determining the sensitivity of a fractured medium to external seismic excitation is the polarization angle of the transverse wave. In general, the sensitivity of a fractured reservoir to the passage of seismic waves and, consequently, the intensity of the seismohydrodynamic effect is determined by the mutual orientation of the wave arrival vector (defined by the azimuth and angle of incidence), the direction of shear in the wave (defined by the polarization angle), and the orientation of the fracturing. As a result of the studies, conditions for the realization of maximum and zero pore-elastic response of the reservoir have been determined.

The practical significance of the studies lies in expanding the diagnostic potential of seismo-hydrodynamic monitoring in seismically active regions. A joint analysis of wave field parameters and pressure variations in monitoring wells also allows for the reconstruction of fracture orientation and the assessment of the degree of reservoir disturbance.

ТРИГГЕРНЫЙ ЭФФЕКТ РОЕВОЙ АКТИВНОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

В. С. Лютикова*, И. Н. Литовченко

Национальный научный центр сейсмологических наблюдений и исследований МЧС РК, Алматы, Казахстан

**E-mail: irgal05@rambler.ru*

В ходе исследований триггерных эффектов в геосистемах анализируются рои землетрясений. При этом, за рой землетрясений принимается не цепочка афтершоков, а совокупность событий сходной интенсивности, возникающих в локальной зоне коры без главного толчка. Такое поведение указывает на каскадное освобождение напряжений, где каждый сброс активирует соседние участки. Нет доминирующего события, главного, а только взаимное смещение энергии между очагами, похожими по масштабу. Каждое землетрясение в рое изменяет местное поле напряжений. Даже небольшое приращение касательного напряжения или снижение эффективного нормального давления может вывести разлом из метастабильного состояния. Критерий Кулона-Мора определяет момент разрушения: когда соотношение сил на плоскости сдвига достигает порога. Эта неустойчивость передаётся по цепи, т.е. один толчок провоцирует следующий. Флюиды играют ключевую роль в роевой активности. Повышение порового давления уменьшает эффективное нормальное напряжение, ослабляя сопротивление сдвигу. В регионах с активной миграцией флюидов, например, вулканических и гидротермальных системах, даже незначительные изменения могут спровоцировать последовательные события. Послужить триггером. Например, Йеллоустонская кальдера может служить примером такого поведения: рои часто связаны с подъёмом глубинных флюидов. Триггерный эффект здесь неоднороден. Механические возмущения сочетаются с гидродинамическими фронтами повышенного давления. Давление распространяется быстрее, чем деформация, а это создаёт сложную картину активации. Дополнительно действует динамическое триггеринг – воздействие, когда импульсы от удалённых крупных землетрясений могут инициировать локальные сбои. Напряжения от сейсмических волн малы, но в средах близких к пределу прочности они достаточны для запуска новых событий. Подобная реакция наблюдалась после крупных толчков на разломе Сан-Андреас, когда система демонстрирует высокую чувствительность к внешним воздействиям. В концептуальном плане рой можно рассматривать как нелинейную систему, находящуюся в состоянии, близком к самоорганизующейся критичности. Малые изменения параметров среды способны вызвать серию событий различного масштаба. Изучение триггерного эффекта имеет важное практическое значение, поскольку способствует более точной оценке сейсмической опасности и пониманию условий возможного перехода роя к более крупному землетрясению.

TRIGGER EFFECT OF EARTHQUAKE SWARMS

V. S. Lyutikova*, I. N. Litovchenko

National Scientific Center for Seismological Observations and Research of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan

**E-mail: irgal05@rambler.ru*

Earthquake swarms are analyzed in studies of trigger effects in geosystems. A swarm is defined not as a chain of aftershocks, but as a set of events of similar intensity occurring in a local crustal zone without a mainshock. This behavior indicates a cascading stress release, with each fault activating adjacent areas. There is no dominant, primary event, only a mutual energy shift between foci of similar scale. Each earthquake in a swarm alters the local stress field. Even a small increase in shear stress or a decrease in effective normal pressure can cause a fault to exit its metastable state. The Mohr-Coulomb criterion determines the moment of failure: when the force ratio on the shear plane reaches a threshold. This instability is transmitted along the chain, meaning one shock triggers the next. Fluids play a key role in swarm activity. An increase in pore pressure reduces the effective normal stress, weakening shear resistance. In regions with active fluid migration,

such as volcanic and hydrothermal systems, even minor changes can trigger sequential events. They can act as triggers. For example, the Yellowstone Caldera exemplifies this behavior: swarms are often associated with the upwelling of deep fluids. The triggering effect here is heterogeneous. Mechanical disturbances are combined with hydrodynamic high-pressure fronts. The pressure propagates faster than the deformation, creating a complex activation pattern. Dynamic triggering also plays a role—the effect when impulses from distant large earthquakes can initiate local faults. The stresses from seismic waves are small, but in environments close to their ultimate strength, they are sufficient to trigger new events. A similar response was observed after large tremors on the San Andreas Fault, when the system demonstrates high sensitivity to external influences. Conceptually, a swarm can be viewed as a nonlinear system in a state close to self-organizing criticality. Small changes in environmental parameters can trigger a series of events of varying magnitudes. Studying the trigger effect has important practical implications, as it facilitates a more accurate assessment of seismic hazard and an understanding of the conditions under which a swarm can transition to a larger earthquake.

ВОЛНЫ ЦУНАМИ ПРИ ВОЗМОЖНОМ ОБРУШЕНИИ ЧАСТИ ЛЕДНИКА ТУЭЙТСА

Р. Х. Мазова^{1,*}, А. Д. Артемьев¹, А. А. Баранов²

¹Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

²Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: raissamazova@yandex.ru

Некоторые антарктические ледники играют важную роль в изменении уровня мирового океана и могут представлять угрозу в случае их разрушения. Ледники разрушаются вследствие комбинированного воздействия многих факторов, воздействующих на них, главными из которых являются поступление теплой морской воды под шельфовые части ледников, и увеличение подледного теплового потока на суше. Особый научный интерес вызывает процесс обрушения края ледников, представляющий угрозу для прибрежных зон из-за возможного образования цунами.

Так, в последние десятилетия ледник Туэйтса, который является уязвимой частью западно-антарктического ледового щита, демонстрирует выраженные признаки ускоренного разрушения. При этом периодически образуются огромные айсберги, такие как айсберг В-22А длиной 80 и шириной 45 км, которые откалываются от края ледника Туэйтса. Кроме того, были зафиксированы десятки ранее неизвестных умеренных землетрясений под материковой частью ледника, которые могут привести к отколу ледяного языка. Приведенные выше механизмы воздействия могут вызвать в результате обрушения ледника значительные волны цунами.

В работе проведена оценка величины вертикального колебательного смещения при возможном обрушении отколовшегося фрагмента ледяного языка ледника Туэйтса и генерации длинных морских волн. Приведены оценочные расчёты возможных сценариев обрушения с целью иллюстрации их потенциальных цунамигенных последствий. Показано, что возможные максимальные высоты на побережьях Новой Зеландии и Австралии достигают 3 м, а на побережье Южной Америки до 18 м. Также показано, что возможная зона затопления побережий от цунами связана с процессом обрушения шельфового ледника.

TSUNAMI WAVES WITH POSSIBLE COLLAPSE OF PART OF THWAITES GLACIER

R. K. Mazova^{1,*}, A. D. Artemyev¹, A. A. Baranov²

¹Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

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

*E-mail: raissamazova@yandex.ru

Some Antarctic glaciers play a significant role in global sea level change and could pose a threat if they collapse. Glaciers collapse due to the combined effects of multiple factors, the most important of which are the influx of warm seawater beneath the ice shelves and the increase in subglacial heat flow on land. Of particular scientific interest is the collapse of glacier margins, which poses a threat to coastal zones due to the potential generation of tsunamis. In recent decades, the Thwaites Glacier, a vulnerable part of the West Antarctic Ice Sheet, has shown clear signs of accelerated disintegration. This process periodically produces enormous icebergs, such as iceberg B-22A, which is 80 km long and 45 km wide and calves from the edge of the Thwaites Glacier. Furthermore, dozens of previously unknown moderate earthquakes have been recorded beneath the glacier's continental shelf, potentially triggering the calving of the ice tongue. These mechanisms could trigger significant tsunamis as a result of the glacier's collapse.

This paper estimates the magnitude of vertical oscillatory displacement associated with the potential collapse of a calved fragment of the Thwaites Glacier ice tongue and the generation of long sea waves. Estimates of possible collapse scenarios are presented to illustrate their potential tsunami-causing consequences. It is shown that potential maximum heights on the coasts of New Zealand and Australia reach 3 m, and on the coast of South America, up to 18 m. It is also shown that the potential coastal inundation zone from a tsunami is associated with the ice shelf collapse process.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИНФРАЗВУКОВЫХ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ПОМЕХ

П. Н. Мартысевич*

Центр геофизического мониторинга Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

**E-mail: martysevich@cgm.by*

Корректный анализ и обработка геофизических данных, в частности инфразвуковых, требует уверенности в их качестве. Для этого необходимо исключить наличие помех различной природы в системе сбора данных, в нашем случае – в инфразвуковом канале записи, который включает систему ветрошумоподавления, микробарограф, регистратор, систему электропитания и систему связи. Кроме того, источником шума могут быть инфраструктурные объекты инфразвуковых пунктов регистрации.

Представлены результаты работы по категоризации источников помех в инфразвуковых записях на основе анализа графиков спектральной плотности мощности (СПМ), обобщена информация о типичных помехах инфразвуковых данных следующих категорий: акустической, электрической и сейсмической.

Для исследований используются данные инфразвукового сегмента Международной системы мониторинга Организации договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний. Для каждой категории приведены типичные графики СПМ, краткое описание источника помех и рекомендации по устранению либо снижению помехи. Для шумовых либо импульсных помех акустической природы приводятся примеры резонансных помех в системах шумоподавления и приборных сооружениях и шумы от поврежденных систем шумоподавления. В случае помех электрической природы приводятся примеры помехи от источников питания, сигналы неисправных датчиков и наведенные через систему заземления помехи. Для помех сейсмической (вибрационной) природы приводятся примеры резонансных явлений, индуцированных инфраструктурными объектами. Показано, что помехи резонансной природы могут иметь влияние также на качество данных сейсмических станций. В каждом из рассмотренных случаев даются рекомендации по диагностике канала записи данных и устранению помехи.

INFRA SOUND DATA QUALITY ASSESSMENT BASED ON POWER DENSITY SPECTRA ANALYSIS

P. N. Martysevich*

Center for Geophysical Monitoring, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

**E-mail: martysevich@cgm.by*

Geophysical, in particular infrasonic data processing and analysis demands high data quality. In order to achieve the required quality, the operator needs to recognize the noise of various nature in the data acquisition system, in our case – in the infrasound channel, which includes wind noise reducing system, microbarometer, digitizer, power supply system, and a communication system. Parts of infrastructure of infrasound stations can also introduce noise in the recorded data.

The presentation shows the results of work in the area of categorization of noise sources based on the analysis of power spectral density (PSD) graphs. It also summarizes information about typical noise in the infrasound data in the acoustic, electrical, and seismic categories. The work is based on the operation and troubleshooting experience of the infrasonic segment of the International Monitoring System of the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization. For each noise source category, typical PSD plots are provided, along with a brief description of the noise source and recommendations how to eliminate or reduce the noise. Some examples of resonance interferences are given for wind noise reducing systems and equipment enclosures. Noise description introduced by damaged wind noise reducing system is provided as well. For the noise of electrical origin, we provide some examples of interference from power sources, signals from faulty sensors, and noise induced through the grounding system. For the noise of a seismic (vibration) origin, examples of resonance phenomena induced by infrastructure objects are provided. It is shown that the noise of a resonance origin can also affect the quality of seismic stations' data. For each presented case we give recommendations for troubleshooting and elimination of the noise.

О ПУТЯХ НАГРУЖЕНИЯ СЫПУЧЕЙ СРЕДЫ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ НЕОГРАНИЧЕННЫЕ СДВИГИ БЕЗ ПЕРЕХОДА В ЗАПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ

О. А. Микенина, В. П. Косых*, А. Ф. Ревуженко

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

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

Как известно, при сдвигах γ , больших некоторого критического значения γ^* , геоматериалы, как правило, переходят в предельное состояние. Оно характеризуется появлением ниспадающей ветви на диаграмме деформирования, трещин, в сыпучих материалах – локализацией сдвигов и т. д. Однако так происходит не всегда. В экспериментах на сложное нагружение с непрерывным поворотом осей тензора деформаций было обнаружено, что сыпучий материал может испытывать большие деформации сдвига $\gamma \gg \gamma^*$ и при этом не проявлять никаких свойств предельного состояния [1]. Сложное нагружение осуществлялось в условиях плоской деформации. На границе эллиптической области задавался вектор скорости, постоянный по модулю и ориентированный вдоль касательной к эллипсу. Все первоначально прямолинейные волокна, проходящие через центр эллипса, в процессе нагружения переходят в спиральные кривые, причем длина их и деформация области неограниченно увеличиваются. При этом никаких признаков предельного состояния не наблюдалось. В чем причина? По-видимому, причина связана не столько с поворотом осей тензора деформаций, сколько с циклическим характером деформирования: материальное волокно многократно проходит через большую и малую оси эллипса. На эти циклы накладывается остаточная деформация. В целом нагружение можно отнести к типу «шаг – вперед, 0.9 шага назад...». Значит, если подобное нагружение реализовать без поворота осей тензора деформаций, то перехода в предельное состояние можно будет избежать. Указанная программа была реализована на приборе однородного сдвига.

Вначале определялся критический угол сдвига γ^* при монотонном сдвиге образца. При сдвиге $\gamma^* = 5^\circ - 6^\circ$ на диаграмме $\tau/\sigma - \gamma$ появляется ниспадающая ветвь и, несколько позже, на поверхности материала проявляются линии скольжения. Затем для новых образцов осуществлялся сдвиг в прямом направлении на угол 4° , затем назад на угол 3.6° , далее вновь вперед на 4° и назад на 3.6° и т.д., т.е. по программе «шаг вперед – 0.9 шага назад». В этих экспериментах общий сдвиг достигал 20° и при этом локализация сдвигов и ниспадающие ветви на диаграммах $\tau/\sigma - \gamma$ не появлялись.

Было проведено численное моделирование приведенных процессов деформирования сыпучих материалов методом дискретных элементов. Получено качественное соответствие результатов расчетов и экспериментов. Таким образом, сыпучий материал, подвергнутый знакопеременным сдвигам с незамкнутыми циклами нагружения, может накапливать неограниченные деформации без перехода в предельное состояние.

Литература

1. Ревуженко А.Ф. Механика сыпучей среды. Новосибирск : Офсет. 2003. – 373 с.

ON LOADING PATHS OF GRANULAR MEDIA THAT PROVIDE UNLIMITED SHEAR WITHOUT TRANSITION TO A POST-LIMITED STATE

O. A. Mikenina, V. P. Kosykh*, A. F. Revuzhenko

Chinakal Institut of Mining of Siberian Branch of Russian academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

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

As is well known, under shear γ greater than a certain critical value γ^* , geomaterials typically transition to a post-limited state. This is characterized by the appearance of a softening branch on the stress-strain diagram, cracks, and, in granular materials – localized shear, etc. However, this is not always the case. In experiments on complex loading with continuous rotation of the strain tensor axes, it was found that granular materials be

can deformed by shear large than critical value $\gamma \gg \gamma^*$ without any post-limited properties. Complex loading was performed under plane strain conditions. At the boundary of the elliptical region, a velocity vector was specified, constant in magnitude and oriented along the tangent to the ellipse. All initially rectilinear fibers passing through the center of the ellipse transform into spiral curves during loading, with their length and the deformation of the region increasing indefinitely. However, no signs of a post-limited state were observed. What is the cause? Apparently, the cause is not so much the rotation of the strain tensor axes, but rather the cyclic nature of the deformation: the material fiber repeatedly passes through the major and minor axes of the ellipse. A residual deformation is superimposed on these cycles. Overall, the loading can be classified as «one step forward, 0.9 steps back...». This means that if such loading is implemented without rotation of the strain tensor axes, the transition to a beyond-limit state can be avoided.

The specified program was implemented on a uniform shear device. First, the critical shear angle γ^* was determined for monotonic shear of the specimen. At a shear of $\gamma^* = 5^\circ\text{--}6^\circ$, a softening branch appears on the $\tau/\sigma - \gamma$ diagram, and, somewhat later, slip lines appear on the material surface. New specimens were then subjected to forward shear of 4° , then backward shear of 3.6° , then forward shear of 4° and backward shear of 3.6° , and so on, using the «one step forward – 0.9 steps back» program. In these experiments, the total shear reached 20° , and no shear localization or softening appeared on the $\tau/\sigma - \gamma$ diagrams. Numerical modeling of the described deformation processes of granular materials was performed using the discrete element method. Qualitative agreement between the calculated and experimental results was obtained.

Thus, granular materials subjected to alternating shear with open loading cycles can accumulate unlimited strains without reaching a transient state.

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПОДРАБОТАННОГО МАССИВА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ И РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В. О. Михайлов¹ *, А. А. Барях² **, Н. А. Самоделкина², И. П. Бабаянц¹, Е. П. Тимошкина¹

¹Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

²Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия,

*E-mail: mikh@ifz.ru

**E-mail: bar@mi-perm.ru

На примере Верхнекамского месторождения солей показана возможность использования данных радарной интерферометрии для оценки и прогноза изменения напряженно-деформированного состояния подработанного породного массива. Объектом исследований являлся Первый Березниковский калийный рудник, затопленный в 2006 г. в результате аварийного прорыва пресных вод в горные выработки. Вследствие высокой растворимости соляных пород в пределах шахтного поля до сих пор сохраняются достаточно высокие скорости оседания земной поверхности, которые контролируются геодезическими методами по заложенным профильным линиям и площадной радарной съемкой спутником TerraSAR-X с периодом 11 дней по снимкам с 2020 по 2024 годы за бесснежный период, который в Пермском крае обычно длится с конца апреля до середины октября. Смещения рассчитывались по последовательным парам снимков, а затем суммировались. Также к полной серии применялась технология точечных отражателей ИРТА, реализованная в программном пакете GAMMA. Спутниковые данные показывают, что оседания земной поверхности в г. Березники в основном происходят в юго-западной части города и в расположенных южнее поселках. Также относительно новая область оседаний выявлена восточнее города, в районе пос. Суханово. На карте средних скоростей оседаний выделяется мульда сдвижения в западной части города, простирающаяся в субмеридиональном направлении. Южнее ее пересекает вторая мульда, широтного простирания, которая простирается до пос. Суханово.

Геомеханическая интерпретация данных радарной интерферометрии основывалась на трехмерном математическом моделировании процесса деформирования подработанного массива. Расчетная схема отражала весь комплекс горно-геологических и горнотехнических условий отработки, а также группу факторов, связанных с прорывом пресных вод в горные выработки. Численные расчеты базировались на полуаналитической схеме метода конечных элементов. В рамках разработанной модификации метода переменных модулей деформаций данные радарной интерферометрии являлись элементом параметрического обеспечения геомеханической модели, определяющей деформирование подработанного массива во времени.

ROCK MASS CONDITION ASSESSMENT USING INSAR AND NUMERICAL MODELING

V. O. Mikhailov¹ *, A. A. Baryakh² **, N. A. Samodelkina², I. P. Babayants¹, E. P. Timoshkina¹

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

²Mining Institute, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

*E-mail: mikh@ifz.ru

**E-mail: bar@mi-perm.ru

The applicability of InSAR technique in stress-strain assessment and alteration prediction in rock mass is illustrated as a case-study of the Upper Kama Salt Deposit. The object of research is Berezniki Mine-1 flooded in 2006 after an accidental freshwater inrush. Because of high solubility of salt rocks, velocity of ground subsidence is yet very high within the mine field. Subsidence monitoring is carried out here using benchmark surveying along existing profile lines and TerraSAR-X-base radar survey with a time-interval of 11 days. We used SAR images from 2002 to 2024 for the snow-free period, which in the Perm region typically lasts from late April to mid-October. Displacements were calculated from successive pairs of images and then summed.

IPTA point reflector technology, implemented in the GAMMA software package, was also applied to the full series. Satellite data show that ground subsidence in Berezniki is primarily occurring in the southwestern part of the city and in the villages located to the south. A relatively new area of subsidence has also been identified east of the city, near Sukhanovo village. The map of average subsidence rates reveals a trough of displacement in the western part of the city, extending in a submeridional direction. Further south, it is intersected by a second trough, oriented east-west, which extends to Sukhanovo village.

The InSAR data were interpreted using 3D mathematical modeling of deformation process in undermined rock mass. The computational model displayed a whole set of geological and geotechnical conditions, and a group of factors associated with the freshwater inrush. The numerical calculations used the semi-analytical finite element method. Within the framework of the developed modification of the method for variable-module deformations, InSAR data were a part of the parametric content of the geomechanical model determining deformation of undermined rock mass in time.

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ
ПРИ ПОДГОТОВКЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ ПО ГЕТЕРОГЕННУМУ РАЗЛОМУ**

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

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: morozovaxg@gmail.com*

Землетрясения как правило инициируются в результате проскальзывания по уже сформированным тектоническим разломам. Такие разломы обладают пространственно-неоднородной структурой как вкрест, так и вдоль их простираения. Закономерности распределения участков с различными фрикционными свойствами в плоскости разлома в значительной степени контролируют динамику скольжения разломов. Невозможность прямого изучения структуры разломов на сейсмогенных глубинах делает особо актуальной разработку методов диагностики разломов, позволяющих получать информацию о структурных особенностях областей формирования очагов землетрясений и их динамике.

Созданная в ИДГ РАН установка для исследования процесса сдвига по контакту между блоками горной породы метрового масштаба была использована для изучения деформационных процессов на разломе с гетерогенной структурой плоскости скольжения, содержащей контактные области – аналоги зон асперити в модели Х. Канамори. В работе представлены результаты серии экспериментов по сдвиговому деформированию модельного разлома с пространственно-неоднородной структурой РАМА (ИДГ РАН), в которой варьировались конфигурация контактных зон и взаимное расположение. Моделью разлома служил нагруженный контакт двух блоков диабаз размером 750×120 мм². Процесс формирования динамического проскальзывания, который обусловлен разрушением асперити, сопровождался излучением большого количества акустических импульсов, которые регистрировались датчиками АЭ в частотном диапазоне 20–80 кГц. Задача локализации зарегистрированных импульсов акустической эмиссии выполнялась методами машинного обучения. Исследование пространственно-временной эволюции сдвигового деформирования гетерогенного разлома позволило выявить особенности подготовки системы к динамическому проскальзыванию. В ходе экспериментов данные пространственного распределения импульсов позволили выявить особенности внутренней структуры разломной зоны.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда

(проект № 22-17-00204-П «Геомеханика разломов земной коры – от региональных масштабов до микротрещин»).

**SPATIO-TEMPORAL PATTERNS OF ACOUSTIC EMISSION IN THE PREPARATION OF DYNAMIC
SLIP ALONG A HETEROGENEOUS FAULT**

K. G. Morozova*, A. A. Ostapchuk, D. V. Pavlov

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

**E-mzil: morozovaxg@gmail.com*

Earthquakes are usually initiated as a result of slipping over already formed tectonic faults. Such faults have a spatially heterogeneous structure both interspersed and along their strike. The patterns of distribution of sections with different frictional properties in the fault plane largely control the dynamics of fault sliding. The impossibility of directly studying the structure of faults at seismogenic depths makes it particularly urgent to develop methods for fault diagnosis that allow obtaining information about the structural features of earthquake source areas and their dynamics.

An installation created at the IDG RAS to study the shear process along the contact between meter-scale rock blocks was used to study deformation processes on a fault with a heterogeneous structure of the sliding plane containing contact areas – analogues of asperity zones in the Kanamori model. The paper presents

the results of a series of experiments on shear deformation of a model fault with a spatially inhomogeneous RAMA structure (IDG RAS), in which the configuration of the contact zones and their relative positions varied. The model of the fault was the loaded contact of two blocks of diabase measuring $750 \times 120 \text{ mm}^2$. The process of dynamic slippage formation, which is caused by the destruction of asperity, was accompanied by the emission of a large number of acoustic pulses, which were recorded by AE sensors in the frequency range of 20–80 kHz. The task of localizing the recorded acoustic emission pulses was performed using machine learning methods. The study of the spatiotemporal evolution of the shear deformation of a heterogeneous fault revealed the features of preparing the system for dynamic slippage. During the experiments, the spatial pulse distribution data revealed the features of the internal structure of the fault zone.

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО КВАРЦЕВОГО ГРАВИМЕТРА ГНУ-КВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОКРЫВАЮЩЕЙ ТОЛЩЕ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ НЕФТЕГАЗОВЫХ ХРАНИЛИЩ В СОЛЯНЫХ ФОРМАЦИЯХ

А. Р. Мухаметзянов*

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: AmirFly@yandex.ru*

Введение. Эксплуатация подземных хранилищ газа в соляных формациях сопровождается длительным техногенным воздействием на вмещающий породный массив. Циклические изменения внутрикавернного давления при закачке и отборе газа, а также ползучесть каменной соли инициируют деформационные процессы: конвергенцию стенок каверн, перераспределение напряжений в покрывающей толще и оседание земной поверхности. Накопление необратимых деформаций способно провоцировать индуцированную микросейсмичность и нарушение герметичности хранилища. Существующие методы контроля - нивелирование, каротаж каверн, точечные геомеханические измерения – обеспечивают мониторинг преимущественно кумулятивных деформаций и не позволяют оперативно выявлять начальные стадии деструктивных процессов. Это обуславливает потребность в методах, способных регистрировать слабые динамические проявления деформирования в режиме, близком к реальному времени.

Цель работы. Теоретическое обоснование применения модернизированного кварцевого гравиметра ГНУ-КВ для мониторинга деформационных процессов в покрывающей толще подземных газовых хранилищ посредством регистрации и параметризации микросейсмических сигналов, генерируемых ползучестью, трещинообразованием и перераспределением напряжений.

Методы. Подход основан на нестандартном использовании гравиметра ГНУ-КВ в режиме высокочувствительного датчика микросейсмических колебаний. Астазированная маятниковая система прибора с порогом чувствительности порядка 0.006 мГал в силу принципа эквивалентности воспринимает инерционные ускорения от колебаний грунта с точностью, сопоставимой с реакцией на вариации гравитационного поля. Модернизация предусматривает замену оптического окуляра цифровой видеокамерой с преобразованием видеозаписи колебаний индикатора в цифровые временные ряды посредством алгоритмов компьютерного зрения. Пункты регистрации размещаются на земной поверхности по профилям, пересекающим проекцию каверного поля. Измерения выполняются в различные фазы эксплуатационного цикла: при закачке, отборе и в период покоя. Для параметризации сигналов применяется комплекс метрик: среднеквадратичное значение амплитуды как мера общей микросейсмической активности; эксцесс распределения амплитуд как индикатор импульсных процессов трещинообразования; энтропия Шеннона, отражающая структурную сложность сигнала; показатель Хёрста, оценивающий персистентность деформационного процесса.

Ожидаемые результаты. В зонах устойчивой покрывающей толщи микросейсмический фон предположительно будет характеризоваться стабильными значениями параметров вне зависимости от фазы эксплуатации. Над участками активной конвергенции каверн ожидается систематическое изменение параметров, коррелирующее с циклами закачки и отбора: рост амплитуды и эксцесса в фазы максимальных градиентов давления, увеличение энтропии вследствие рассеяния на вновь образованных неоднородностях. Эволюция показателя Хёрста в направлении значений, характерных для случайного процесса, может свидетельствовать об утрате массивом стабилизирующих механизмов. Предполагается, что метод обеспечит пространственную дифференциацию участков покрывающей толщи по степени деформационной активности, дополняя существующие системы мониторинга. Экспериментальная верификация планируется на действующих объектах подземного хранения газа.

APPLICATION OF A MODIFIED GNU-KV QUARTZ GRAVIMETER FOR MONITORING DEFORMATION PROCESSES IN THE OVERBURDEN DURING UNDERGROUND DEVELOPMENT OF OIL AND GAS STORAGE FACILITIES IN SALT FORMATIONS

A. R. Mukhametzyanov*

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

**E-mail: AmirFly@yandex.ru*

Introduction. The operation of underground gas storage facilities in salt formations is accompanied by prolonged technogenic impact on the host rock mass. Cyclic changes in intracavern pressure during gas injection and withdrawal, as well as rock salt creep, initiate deformation processes: cavern wall convergence, stress redistribution in the overburden, and ground surface subsidence. Accumulation of irreversible deformations may provoke induced microseismicity and compromise storage integrity. Existing control methods - leveling, cavern logging, point geomechanical measurements - provide monitoring of predominantly cumulative deformations and do not allow timely detection of the initial stages of destructive processes. This necessitates the development of methods capable of recording weak dynamic manifestations of deformation in near-real-time mode.

Objective. Theoretical substantiation of the application of a modified GNU-KV quartz gravimeter for monitoring deformation processes in the overburden of underground gas storage facilities through registration and parameterization of microseismic signals generated by creep, fracturing, and stress redistribution.

Methods. The approach is based on the non-standard use of the GNU-KV gravimeter as a highly sensitive microseismic vibration sensor. The astatized pendulum system of the instrument, with a sensitivity threshold of approximately 0.006 mGal, by virtue of the equivalence principle perceives inertial accelerations from ground vibrations with an accuracy comparable to its response to gravitational field variations. The modification involves replacing the optical eyepiece with a digital video camera, followed by conversion of the indicator oscillation video recording into digital time series using computer vision algorithms. Registration points are placed on the ground surface along profiles crossing the cavern field projection. Measurements are performed during different phases of the operational cycle: during injection, withdrawal, and idle periods. For signal parameterization, a set of metrics is applied: root mean square amplitude as a measure of overall microseismic activity; kurtosis of the amplitude distribution as an indicator of impulsive fracturing processes; Shannon entropy, reflecting the structural complexity of the signal; and the Hurst exponent, assessing the persistence of the deformation process.

Expected results. In zones of stable overburden, the microseismic background is expected to be characterized by stable parameter values regardless of the operational phase. Above areas of active cavern convergence, systematic changes in parameters correlating with injection and withdrawal cycles are anticipated: an increase in amplitude and kurtosis during phases of maximum pressure gradients, and an increase in entropy due to scattering on newly formed heterogeneities. Evolution of the Hurst exponent toward values characteristic of a random process may indicate the loss of stabilizing mechanisms within the rock mass. It is assumed that the method will provide spatial differentiation of overburden sections according to the degree of deformation activity, supplementing existing monitoring systems. Experimental verification is planned at operating underground gas storage facilities.

ЗАВИСИМОСТЬ ПРОНИЦАЕМОСТИ ОТ НАПРЯЖЕНИЙ В РЕГУЛЯРНО-БЛОЧНЫХ ГЕОСРЕДАХ С КОНТРАСТНЫМИ ФИЛЬТРАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ ПО ДАННЫМ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Л. А. Назаров*, Л. А. Назарова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской Академии наук, Новосибирск, Россия

*E-mail: mining1957@mail.ru

Введение. Промышленная добыча метана из угольных пластов, захоронение газообразных отходов производства в природных формациях, обоснование схем вскрытия и разработки нефтегазовых залежей – вот далеко не полный перечень проблем, для решения которых необходимы данные о фильтрационно-емкостных свойствах пород-коллекторов, слагающих продуктивную толщу. Последняя во многих случаях имеет перемежаемую нарушениями слоистую структуру, обусловленную генезисом и «тектонической историей» месторождения. Здесь предложен и в лабораторных условиях апробирован метод определения зависимости проницаемости таких структур от напряжений по данным фильтрационных испытаний блочных образцов при движении флюида вкрест простирания нарушений сплошности.

Модель эксперимента. Движение флюида в модельном образце описывалось системой, включающей уравнение сохранения массы, закон Дарси и баротропное уравнение состояния газа (линейная зависимость плотности от давления). На внутренних границах (межблочные контакты) задавались условия непрерывности давления и расхода, боковые грани образца непроницаемы, а на торцах задано постоянное дифференциальное давление. Показано, что в такой постановке при стационарном режиме фильтрации система уравнений имеет аналитическое решение, с помощью которого выведена расчетная формула зависимости расхода Q на торце от параметров модели.

Лабораторные испытания. Для экспериментов использовался мелкозернистый песчаник с включениями карбонатных аккреций (порода-коллектор одного из нефтяных месторождений Западной Сибири), его модуль Юнга 0.92 ГПа, пористость 0.28 и проницаемость $k = 1.4$ Д определялись по стандартным методикам. Были изготовлены пластины 65×75 мм и толщиной $H = 10$ мм, из которых компоновались блочные образцы. На первом предварительном этапе, по разработанной ранее методике [1], находилось уравнение состояния межблочных нарушений – зависимость конвергенции берегов W от нормального напряжения S , описываемая дробно-линейной функцией $W(S) = AS/(B + S)$, где эмпирические константы $A = 49$ мкм и $B = 0.11$ МПа определялись по результатам испытания образца из $N = 6$ пластин.

На втором этапе блочный образец с изолированными резиновой манжетой боковыми гранями помещался в герметичную камеру, ортогонально нарушениям сплошности прикладывалось ступенчато нарастающее напряжение $S(m)$ (m – шаг нагружения) и создавался перепад давления $P(n)$ газа, регистрировался стационарный расход $Q(m, n)$. При этом раскрытость нарушений H , необходимая для интерпретации результатов фильтрационных испытаний, вычислялась с использованием эмпирической зависимости $W(S)$. Диапазоны варьируемых в эксперименте параметров: $S(m) = 0.16, 0.32, \dots, 1.1$ МПа; $P(n) = 0.05, 0.10, \dots, 0.13$ атм. По найденной аналитической зависимости $Q(m, n)$ от $k, N, H, P(n)$, геометрических размеров блочного образца и вязкости воздуха рассчитывалась проницаемость нарушений сплошности K на каждом шаге нагружения m . Оказалось, что величина K обратно пропорциональна квадрату напряжения $S(m)$, приложенного перпендикулярно нарушению.

Закключение. Теоретически обоснован и практически апробирован метод, позволяющий установить зависимость проницаемости K межблочных нарушений от нормальных напряжений при движении флюида вкрест простирания последних. Это дает возможность количественно оценить транспортные характеристики блочных геосред с контрастными фильтрационными свойствами структурных элементов.

*Работа выполнена в рамках проекта НИР ИГД СО РАН
(номер государственной регистрации 124020700085-5).*

Литература

1. Nazarov, L.A., Golikov, N.A., Skulkin, A.A. & Nazarova, L.A. Method of experimental determination of deformation and flow characteristics in rocks with regular block structure. MIAB. Mining Inf. Anal. 2023. Bull. (11). P. 70–81.

PERMEABILITY ON STRESS DEPENDENCE IN REGULAR-BLOCK GEOMEDIA WITH CONTRASTING FILTRATION PROPERTIES BY LAB TEST DATA

L. A. Nazarov*, L. A. Nazarova

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

**E-mail: mining1957@mail.ru*

Introduction. Industrial coalbed methane production, disposal of gaseous industrial waste in natural formations, and the substantiation of drilling and development plans for oil and gas deposits – this is far from a complete list of problems requiring data on the poroperm properties of reservoir rocks that make up the productive strata. The latter often exhibits a layered structure interspersed with faults. A method for determining the permeability of such structures as a function of stress is proposed and tested in the laboratory using filtration tests of block specimens when fluid flow across fault

Experimental model. Fluid flow in the specimen was described by a system including the continuity equation, Darcy's law, and the barotropic state equation for gas. Continuity of pressure and flow conditions were specified at the interblock joints, the side faces of the specimen were impermeable, and a constant differential pressure was specified at the ends. It was shown that in this formulation, under steady-state filtration conditions, the system of equations has an analytical solution, which was used to derive a calculation formula for the dependence of flowrate Q on the model parameters.

Laboratory tests. Fine-grained sandstone with inclusions of carbonate accretion was used for the experiments. Its Young's modulus of 0.92 GPa and permeability $k = 1.4$ D were determined using standard methods. Six plates (thickness of 10 mm) were manufactured to assemble block specimens. In the first stage, using approach, the joint state equation was found – the dependence of the edges convergence W on the normal stress S : $W(S) = AS/(B+S)$, where A and B are the empirical constants.

At the second stage, the block specimen with insulated side faces was placed in a chamber, a stepwise stress $S(m)$ was applied orthogonally to the joints, a pressure drop $P(n)$ of the gas was created, and the steady-state flow rate $Q(m, n)$ was recorded. The joint opening H , necessary for the interpretation of the filtration test results, was calculated by $W(S)$. The ranges of the parameters varied in the experiment: $S(m) = 0.16, 0.32, \dots, 1.1$ MPa; $P(n) = 0.05, 0.10, \dots, 0.13$ bar. Based on the found analytical dependence of $Q(m, n)$ on $k, N, H, P(n)$, the specimen geometric dimensions and the air viscosity, the joints permeability K was calculated at each loading step m . It turned out that K is inversely proportional to the square of the stress $S(m)$ applied perpendicular to the joints.

Conclusion. A method for establishing the relationship between the permeability K of interblock joints and normal stresses during fluid flow across their strike has been theoretically substantiated and practically tested. This enables a quantitative assessment of the transport characteristics of block geomedia with contrasting filtration properties of structural elements.

КОНТРОЛЬ ВЫБРОСОПАСНОСТИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОГО ПРОСВЕЧИВАНИЯ: ТЕОРИЯ И ЛАБОРАТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Л. А. Назарова*, Л. А. Назаров

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской Академии наук, Новосибирск, Россия

**E-mail: larisa.a.nazarova@mail.ru*

Введение. При производстве очистных работ на угольных месторождениях комбайновыми комплексами скорость продвижения забоя достигает 20–30 м в сутки, что вызывает быстрое изменение напряжений в окрестности забоя, которое может стать триггером динамических явлений (быстрое разрушение пород, внезапный выброс угля и газа, горный удар). В породном массиве события класса 4 и выше происходят, как правило, в окрестности нарушений сплошности (тектонические разломы, дизъюнктивы), которые при изменении конфигурации подземного пространства являются концентраторами напряжений. Аналогичную роль играют некоторые участки контакта субгоризонтальных угольных пластов с вмещающими породами, зачастую представляющие собой тонкие прослои высокозольных глинистых углей – слабые зоны, которые могут быть очагами динамических событий. Предварительное выявление местоположения слабых зон геофизическими методами позволит осуществить профилактические мероприятия для уменьшения риска опасных динамических проявлений горного давления.

Геомеханическая модель угольного пласта. Пологозалегающая угольная залежь разрезана на панели, которые обрабатываются механизированным комплексом. В модели учитываются размеры пласта, напряжения в нетронутом массиве, физические свойства пород, неоднородность контактных условий на границе пласта и вмещающих пород (наличие участков с пониженными деформационно-прочностными характеристиками), выемка имитируется поэтапным изменением конфигурации выработанного пространства. Расчеты показали, что с приближением забоя к слабой зоне в ее окрестности возникают области горизонтального растяжения, величина напряжений в которых превышает соответствующий предел прочности угля. Это может стать причиной разрушения и выброса угля и газа в очистное пространство.

Для обоснования возможности выявления слабых зон проводились лабораторные эксперименты. Из эпоксидной смолы изготовлены параллелепипеды ($100 \times 140 \times 40$ mm) и стандартные цилиндрические образцы. Последние испытывались на одноосное сжатие, одновременно ультразвуковым методом определялась скорость Р-волн V . В результате установлены деформационные свойства модельного геоматериала и эмпирическая зависимость V от среднего напряжения s . Параллелепипеды подвергались квазистатическому вертикальному сжатию, при этом на контакте горизонтальных граней с плитами пресса посредством тонких силиконовых пластинок создавались участки с низким трением. На вертикальных гранях устанавливались по 6 пьезодатчиков Sm , на каждом шаге нагружения k осуществлялось прозвучивание и измерялось время $T(k, m, n)$ пробега Р-волны между датчиками Sm и Sn . По $T(k, m, n)$ выполнялась томография и находилось распределение W скорости продольных волн в освещенной области D образца.

Инверсия данных эксперимента (определение местоположения слабых зон). Используя W и зависимость $V(s)$, в D рассчитывалось среднее напряжение $s(D)$, которое являлось входными данными для граничной обратной задачи – «при заданной вертикальной нагрузке найти касательные напряжения на горизонтальных границах образца по известному распределению $s(D)$ ». Установлено, что сформулированная задача однозначно разрешима, разработан и численно реализован FEM алгоритм, основанный на построении дискретной функции Грина. Найденное таким образом распределение Касательные напряжения на горизонтальных гранях параллелепипеда, найденные в результате решения обратной задачи по $s(D)$, оказались практически нулевыми на краевых участках, что соответствует условиям эксперимента.

Закключение. Предложенный подход позволяет не только проводить реконструкцию напряженно-деформированного состояния в процессе выемки запасов, но и выявлять аномальные

участки на контакте угольных пластов с вмещающими породами, являющиеся очаговыми зонами динамических событий.

*Работа выполнена в рамках проекта НИР ИГД СО РАН
(номер государственной регистрации 124020700085-5).*

COALBED OUTBURST HAZARD MONITORING USING ACOUSTIC SCANNING: THEORY AND LABORATORY EXPERIMENT

L. A. Nazarova*, L. A. Nazarov

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

**E-mail: larisa.a.nazarova@mail.ru*

Introduction. When mining coal deposits with shearer complexes, the working face advances at speeds of up to 20-30 meters per day, causing rapid stress changes in the vicinity of the working face, which can trigger dynamic events. In rock mass, events of class 4 and higher typically occur near discontinuities, which act as stress concentrators. A similar role is played by certain areas of contact between coalbeds and the host rock, often consisting of thin layers of high-ash clayey coals—weak zones (WZ) that can become foci for dynamic events. Preliminary identification of WZ location will enable the implementation of preventive measures to reduce the risk of hazardous events.

Geomechanical model. A horizontal coal deposit is cut into panels, which are mined by a mechanized system. The model takes into account stresses in the intact massif, rock properties, and the heterogeneity of contact conditions at the coalbed-rock interface (WZ – areas with reduced deformation and strength characteristics). Simulation has shown that as the working face approaches a WZ, horizontal tension zones occur in its vicinity, where the stresses exceed the corresponding coal tensile strength. This can cause failure and the release of coal and gas into the working space.

Laboratory experiments were conducted to validate the possibility of WZ identification. Parallelepipeds ($100 \times 140 \times 40$ mm) and standard cylindrical specimens were made of epoxy resin. The latter were tested for uniaxial compression, while the P-wave velocity V was simultaneously determined using an ultrasonic method. This resulted in the determination of the empirical dependence of V on the mean normal stress s . The parallelepipeds were subjected to quasi-static vertical compression, with thin silicone plates creating low-friction areas at the contact of the horizontal faces with the press platens. Six sensors S_m were mounted on the vertical faces; at each loading step k , sounding was performed and the P-wave travel time $T(k, m, n)$ between sensors S_m and S_n was measured. Tomography was performed using $T(k, m, n)$ and the distribution W of the longitudinal velocity in the illuminated region D of the specimen was found.

Determining the location of WZ. Using W and the $V(s)$ dependence, the stress $s(D)$ was calculated in D . This was used as input for the boundary value inverse problem of «find the shear stresses on the horizontal boundaries of a specimen by $s(D)$ ». The problem was found to be uniquely solvable, and a FEM algorithm was developed and numerically implemented. The shear stress distribution on the horizontal faces of the parallelepiped, determined by solving the inverse problem using $s(D)$, turned out to be nearly zero at the edges of faces, consistent with the experimental conditions.

Conclusion. The proposed approach not only allows for the reconstruction of the stress-strain state during mining but also the identification of anomalous areas at the contact of coalbed with the host rock, which are focal zones of dynamic events.

СТРУКТУРНО-СКЕЙЛИНГОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В АНСАМБЛЯХ ДЕФЕКТОВ И НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

О. Б. Наймарк*, Н. В. Савельева, И. А. Банникова, С. В. Уваров

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

**Email: naimark@icmm.ru*

Физика инициирования очага землетрясений анализируется экспериментально и теоретически на основе представлений о коллективной нелинейной динамике дефектов (сдвигов, микротрещин) как нового класса критических явлений, структурно-скейлинговые переходы [1, 2]. Установленные закономерности перехода от дисперсного к макроскопическому разрушению могут рассматриваться как основа мониторинга сейсмичности и разработки методологии обобщения результатов лабораторных экспериментов на сейсмические масштабы. Физика метастабильных сейсмических событий при формировании очага землетрясения связывается с динамикой установленных коллективных мод дефектов (автоволновых структур и диссипативных структур «обострения»), имеющих природу автомодельных решений, с целью идентификации закономерностей скейлинга в сейсмичности (закона Гутенберга–Рихтера, Омори) при сопоставлении с данными лабораторных динамических и ударно-волновых экспериментов на модельных материалах (ПММА, плавленый кварц). Результаты трех типов экспериментов анализируются в сопоставлении с данными пространственно-временной динамики развития разрушения применительно к инициированию и распространения очага землетрясения. Эксперимент по динамическому распространению трещин в ПММА, совмещенный со скоростной регистрацией динамики поля напряжений (методом фотоупругости), показал «подчинение» динамики двум типам «аттракторов», определяемых автомодельными сингулярными промежуточно-асимптотическими решениями (асимптотика напряжений по Ирвину и сингулярных коллективных мод «обострения», локализованных на спектре пространственно-временных масштабов). Теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены две критические скорости распространения трещины, $0.4V_R$ и $0.6V_R$ (V_R – скорость волны Релея), определяющие диапазон (между критическими скоростями) динамики трещины «с ветвлением» как следствие «перемежаемости» при влиянии двух аттракторов. Анализ статистики «перемежаемости» позволил интерпретацию закономерностей скейлинга Гутенберга–Рихтера. Иницирование очага связывается с взаимодействием коллективных мод «обострения», предшествующих формированию макроскопической трещины. Экспериментальная идентификация двух аттракторов и их свойств проведена на основе обработки данных фазовых портретов для полей напряжений (сечений Пуанкаре), что позволило идентифицировать множество взаимодействующих структур «обострения» и их статистические свойства с закономерностями скейлинга предшоков и афтершоков. Показано, что закон Омори для скоростей, превышающих вторую критическую скорость $0.6V_R$, соответствует выраженной фрагментации материала при формировании множественных «дочерних» трещин [3, 4]

Соответствие режимов скейлинга в сейсмичности различным сценариям разрушения исследовалось в экспериментах при регистрации пространственно-временной динамики фрагментации цилиндрических образцов плавленого кварца на основе данных статистики распределения фрагментов в «сохраненных образцах» и временных распределений сигналов фрактолюминесценции в процессе фрагментации в зависимости от интенсивности нагружения. Обсуждаются качественные изменения статистических распределений с закономерностями скейлинга в сейсмичности.

Исследования поддержаны государственным контрактом № 124020200116-1.

Литература

1. Naimark O.B. Defect induced transitions as mechanisms of plasticity and failure in multifield continua. In: Advances in multifield theories of continua with substructure / Ed.: G. Capriz, P. Mariano. Boston : Birkhauser. 2004. P.75–114
2. Naimark O.B. Structural-scaling transitions and self-similar features of earthquake development // Phys. Mesomechanics. 2008. Vol. 11 (3–4). P. 191–205.

3. Naimark O.B. Structural-Scale Transitions in Solids with Defects and Symmetry Aspects of Field Theory // Phys. Mesomechanics. 2010. Vol. 13 (5–6). P. 306–317.

4. Naimark O. Multiscale Defects Induced Criticality in Damage-Failure Transition Under Intensive Loading (Experimental and Theoretical Results) // Fracture and Structural Integrity. 2019. Vol. 5. P. 74–78. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91989-8_13

STRUCTURAL-SCALING TRANSITIONS IN DEFECT ENSEMBLES AND SOME PATTERNS OF EARTHQUAKE FOCI FORMATION

O. B. Naimark*, N. V. Saveleva, I. A. Bannikova, S. V. Uvarov

Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

*Email: naimark@icmm.ru

Earthquake foci initiation is analyzed experimentally and theoretically based on concepts of collective nonlinear dynamics of defects (slips, microcracks) as new class of critical phenomena, the structural-scaling transition. Established patterns of transition from damage to failure can be considered for seismicity monitoring and development of methodology for generalizing results of laboratory experiments to seismic scales. Metastable seismic events during earthquake foci formation is linked to dynamics of established collective defect modes (autowave structures and dissipative «blow-up» structures), which have the nature of self-similar solutions. This allowed us to identify scaling patterns in seismicity (the Gutenberg-Richter and Omori laws) by comparing with data dynamic and shock-wave experiments on model materials (PMMA, fused quartz). Results of three types of experiments are analyzed in conjunction with data on spatiotemporal dynamics of damage staging as applied to earthquake foci initiation and propagation. Experiment on dynamic crack propagation in PMMA, combined with high-speed recording of stress field dynamics (using photoelasticity), demonstrated the «subordination» of dynamics to two types of «attractors» defined by self-similar singular intermediate-asymptotic solutions (the Irwin stress asymptotics and singular collective «blow-up» modes localized on spectrum of spatiotemporal scales). Two critical crack propagation velocities, $0.4V_R$ and $0.6V_R$ (V_R is the Rayleigh wave velocity), were theoretically substantiated and experimentally supported. These determine the range (between critical velocities) of crack dynamics «with branching» as a consequence of «intermittency» under the influence of two attractors. Analysis of «intermittency» statistics allowed interpretation of the Gutenberg-Richter scaling pattern. Foci initiation is associated with interaction of collective «blow-up» modes preceding formation of a macroscopic crack. Experimental identification of two attractors and their properties was conducted by processing phase portrait data for stress fields (the Poincaré cross-sections). This allowed us to identify multiple interacting «blow-up» structures and their statistical properties, consistent with the scaling patterns of pre-shocks and after-shocks. It was shown that the Omori law for velocities exceeding the second critical velocity of $0.6V_R$ corresponds to pronounced fragmentation of the material during the formation of multiple «daughter» cracks.

Correspondence of seismicity scaling to various failure scenarios was studied experimentally by recording spatiotemporal fragmentation dynamics of cylindrical fused quartz samples based on statistical data of fragments distribution in «recovery samples» and temporal distributions of fractoluminescence signals during fragmentation. Qualitative changes in statistical distributions with patterns of seismicity are discussed.

ТРИГГЕРНЫЕ ФАКТОРЫ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИРОДЫ

В. Л. Натяганов*

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

**E-mail: tenzor-home@yandex.ru*

По временной привязке триггеры опасных явлений природы (ОЯП) можно условно отнести к разряду краткосрочных (от нескольких дней до месяца), среднесрочных (от нескольких месяцев до первых лет) или долгосрочных (десятилетия).

К краткосрочным триггерам электромагнитной природы относятся геоэффективные явления на Солнце (типа сильных вспышек или корональных выбросов массы), которые по эмпирической схеме краткосрочного прогноза (ЭСКП) запускают через одну, две или три недели цепочки землетрясений вдоль сейсмомагнитных меридианов в зонах их пересечения с границами литосферных плит. Заметим, что эти сроки хорошо коррелируют с известными фактами из небесной механики: во время особых фаз Луны (новолуний и полнолуний) притяжение Солнца увеличивает эксцентриситет лунной орбиты, а период и полупериод этих лунных вариаций равны 14.7 и 7.35 суток. К этим и кратным им гармоникам близки и приливно-гравитационные вариации в системе трех тел: Солнце, Земля и Луна. Эти астрономические данные статистически подтверждаются на гистограммах для землетрясений и вулканических извержений, где вблизи новолуний и полнолуний наглядно виден рост этих ОЯП катастрофического характера на 270–300% от средних значений.

К среднесрочным триггерным факторам гравитационной природы следует отнести сезонные вариации угловой скорости собственного вращения Земли. Причем максимальная скорость наблюдается в июле-августе, а минимальная в ноябре и в апреле. В частности, за период 2002–2014 гг. в Камчатской сейсмоопасной зоне почти все официальные прогнозы по ЭСКП для землетрясений с M7+ (включая глубокофокусные) реализовались именно в эти сроки. К среднесрочным триггерам электромагнитной природы необходимо отнести и участвовавшие геомагнитные толчки – резкие изменения параметров собственного магнитного поля Земли.

Подобная активизация природных процессов должна наблюдаться и в более верхних геосферных оболочках планеты: литосфере, гидросфере и атмосфере, о чем свидетельствует рост числа и энергетики ОЯП различных геофизических типов.

К долгосрочным триггерам гравитационной природы следует отнести особые астрономические конфигурации (ОАК) в Солнечной системе, когда Земля в особых точках ее орбиты, Солнце и хотя бы одна из ближайших планет (Венера, Марс или Юпитер) практически располагаются на одной прямой. Подобные ОАК с начала XX века случались по 6 раз с Венерой и Юпитером, а вблизи некоторых из этих лет произошли и Великие противостояния с Марсом, когда его расстояние до Земли сокращается в 7 раз (через 15 или 17 лет) за счет сильной эллиптичности его орбиты. К подобным долгосрочным триггерным ОАК следует отнести и ситуации, когда барицентр Солнечной системы выходит за пределы Солнца, что сопровождается ростом числа и энергетики ОЯП различных геофизических типов. Подобные ОАК были в 1901, 1932, 1970 и 2011–2012 гг. Наиболее неординарные ОЯП случились 18.04.1932 г. (когда произошло пробуждение 25 вулканов вдоль побережья Чили); 11.03.2011 г. у берегов Японии случилось цунамигенное мегаземлетрясение Тохоку; а 14–28.04.2011 в США произошла рекордная серия из более 550 торнадо – половина среднегодовой нормы!

В докладе будут приведены и другие характерные примеры неординарных ОЯП различных геофизических типов с временной привязкой к геоэффективным явлениям на Солнце; геомагнитным толчкам; ОАК в Солнечной системе, включая фазы новолуний и полнолуний, а также Великие противостояния с Марсом.

TRIGGER FACTORS OF DANGEROUS NATURAL PHENOMENA

V. L. Natyaganov*

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Lomonosov Moscow State University", Moscow, Russia

**E-mail: tenzor-home@yandex.ru*

Triggers of dangerous natural phenomena (DNP) can be conditionally classified as short-term (from several days to month), medium-term (from several months to the first years) or long-term (decades).

Short-term triggers of an electromagnetic nature include geoeffective phenomena in the Sun (flares or coronal mass ejections), which, according to the empirical short-term forecast scheme (ESFS), are launching in one, two or three weeks earthquake chains along seismomagnetic meridians in the zones intersection with lithospheric plate boundaries. These dates correlate well with facts: during special phases of the moon (new moons and full moons), increases the eccentricity of the lunar orbit and the period and half-period of these lunar variations are equal to 14.7 and 7.35 days. To these harmonics close tidal-gravitational variations in the three-body system: Sun, Earth and Moon. These astronomical data are statistically confirmed on histograms for earthquakes and volcanic eruptions, where, near new moons and full moons, the growth of these DNP by 270–300% of the average values.

Medium-term trigger factors of gravitational nature include seasonal variations in angular velocity of the Earth's rotation. Maximum velocity is observed in July-August, while minimum - in November and April. During the period 2002–2014, almost all official forecasts for M7+ earthquakes (including deep-focus earthquakes) in Kamchatka seismically active zone were realized during these periods.

Medium-term triggers of an electromagnetic nature include frequent geomagnetic tremors, which are sudden changes in the parameters of the Earth's own magnetic field.

Similar activation of natural processes should be observed in the upper geospheric shells of the planet: the lithosphere, hydrosphere and atmosphere, as evidenced by the growth and energy DNP of various geophysical types.

Long-term triggers of the gravitational nature include special astronomical configurations (SAC) in the Solar System, when the Earth, at special points in its orbit, the Sun and at least one of the nearest planets (Venus, Mars or Jupiter) are located in a straight line. Since the beginning of the 20th century, similar SAC have occurred 6 times with Venus and Jupiter, and near some of these years there have been Great oppositions with Mars, when its distance to Earth is reduced by 7 times (through 15 or 17 years) due to the ellipticity orbit.

Such long-term trigger SAC include situations when the barycenter of the Solar System extends beyond the Sun, which is accompanied by the growth of number and energy DNP of various geophysical types. There were similar SAC in 1901, 1932, 1970 and 2011–2012. The most extraordinary occasions occurred on 04.18.1932 (the awakening of 25 volcanoes in Chile); 03.11.2011 the Tohoku mega-earthquake occurred in Japan; and on 14-28.04.2011 in the USA, series of more than 550 tornadoes occurred – half of the average annual rate!

The presentation will provide other examples of unusual DNP of various geophysical types with a time reference to geoeffective phenomena on the Sun; geomagnetic tremors; SAC in the Solar System, including of new moons and full moons, as well as Great opposition with Mars.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ: ПОЛЕВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ, ЛАБОРАТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ВОЗМОЖНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ

В. А. Новиков*

Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия

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

На возможность электромагнитного инициирования землетрясений указали результаты статистического анализа полевых экспериментов по глубинному зондированию земной коры импульсами постоянного электрического тока на Памире и Северном Тянь-Шане. Однако физические механизмы инициирования сейсмических событий слабыми токами, плотность которых на глубинах расположения эпицентров региональных землетрясений составляет по оценкам $10^{-6} \dots 10^{-7}$ А/м², до сих пор не понята. Анализ выполненных ранее теоретических и экспериментальных работ показывает, что ни одна из предложенных гипотез о возможных физических механизмах инициирования землетрясений электрическими/электромагнитными воздействиями (генерация дополнительных напряжений за счет пьезоэффекта, снижение прочности горных пород за счет повышения внутрипорового давления флюида при протекании через него электрического тока с соответствующим джоулевым нагревом, а также миграция проводящего флюида в разлом под действием силы Лоренца, возникающей при взаимодействии тока и геомагнитного поля) не может объяснить электромагнитные триггерные эффекты при искусственном воздействии на земную кору, что ставит под сомнение реальность их существования. Тем не менее, большое количество опубликованных в последнее время результатов как отечественных, так и зарубежных исследователей о влиянии космической погоды на сейсмическую активность вновь указывает на возможную причинно-следственную связь между солнечными вспышками, протонными событиями, геомагнитными бурями и деформационными процессами в земной коре, которая может быть обусловлена электромагнитными процессами в системе «ионосфера-атмосфера-литосфера». Таким образом, на наш взгляд, дальнейшие исследования физической природы электромагнитного инициирования землетрясений должны быть продолжены и сконцентрированы на поиске дополнительных подтверждений этого явления в различных регионах земного шара с вполне определенными геолого-геофизическими условиями при внешних естественных электромагнитных воздействиях, обусловленных сильными вариациями параметров космической погоды.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда
(проект № 26-19-00238).*

ELECTROMAGNETIC TRIGGERING OF EARTHQUAKES: FIELD OBSERVATIONS, LABORATORY EXPERIMENTS, AND POSSIBLE PHYSICAL MECHANISMS

V. A. Novikov*

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

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

The possibility of electromagnetic triggering of earthquakes has been suggested based on the results of a statistical analysis of field experiments in the Pamirs and Northern Tien Shan using deep sounding of the Earth's crust by injection of DC pulses through the grounded dipole. However, the physical mechanisms by which seismic events are triggered by weak currents, whose density at the depths of regional earthquake epicenters is estimated to be $10^{-6} \dots 10^{-7}$ A/m², remain unclear. An analysis of previously completed theoretical and experimental work shows that none of the proposed hypotheses on the possible physical mechanisms of earthquake triggering by electrical/electromagnetic impacts (generation of additional stresses due to the piezoelectric effect, a decrease in the strength of rocks due to an increase in the pore pressure of the fluid when an electric current flows through it with corresponding Joule heating, as well as the migration of a conductive fluid into a fault under the action of the Lorentz force arising from the interaction of current and

the geomagnetic field) can explain the electromagnetic triggering effects during artificial electric impacts on the Earth's crust, which calls into question the reality of their existence. Nevertheless, the large number of recently published results by both Russian and international researchers on the influence of space weather on seismic activity once again points to a possible causal relationship between solar flares, proton events, geomagnetic storms, and deformation processes in the Earth's crust, which may be provided by electromagnetic processes in the «ionosphere-atmosphere-lithosphere» system. Therefore, in our opinion, further research into the physical nature of electromagnetic earthquake triggering should be continued and focused on finding additional evidence of this phenomenon in various regions of the globe with well-defined geological and geophysical conditions under external natural electromagnetic impacts caused by strong variations in space weather parameters.

ОТКЛИК СЕЙСМИЧНОСТИ ЗОН ПОДГОТОВКИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

В. А. Новиков^{1,3,*}, М. В. Новикова²

¹Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия

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

³Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

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

Предыдущие исследования продемонстрировали существование электромагнитного инициирования землетрясений (ЗТ), включая отклик микросейсмичности на импульсные воздействия от искусственных источников тока, а также на воздействия сильных солнечных вспышек и магнитных бурь. Ранее было показано статистически значимое увеличение сейсмической активности Земли после сильных солнечных вспышек (СВ) класса X, особенно в зоне радиусом 5000 км вокруг субсолнечной точки. Предполагалось, что ЗТ могут быть инициированы всплеском теллурических токов в разломах земной коры, вызванным сильными вариациями геомагнитного поля (ГМП) вследствие воздействия рентгеновского излучения на ионосферу, аналогично инициированию ЗТ импульсами электрического тока, подаваемыми в земную кору от искусственного источника. Было показано, что электромагнитные (ЭМ) эффекты наиболее сильно проявляются в зонах афтершоков сильных землетрясений, где они приводят как к увеличению общего числа афтершоков, так и к возникновению сильных афтершоков с магнитудой $M \geq 6.0$ с задержкой в 6–8 дней после основного толчка. Эта задержка может быть обусловлена миграцией проводящих флюидов в зоны разломов, что снижает их прочность под влиянием изменений геомагнитного поля, что подтверждается результатами анализа сейсмического отклика флюидонасыщенных геотермальных полей в Северной Калифорнии на сильные вариации геомагнитного поля $|dB_x/dt| \geq 50$ нТ/мин.

В продолжение данного исследования был проведен статистический анализ отклика сейсмической активности очаговой зоны землетрясения на мысе Мендосино (Калифорния, США, 05.12.2024г., $M = 7.0$) на динамические воздействия 8 удаленных сильных землетрясений ($M \geq 7.0$) в Северной Калифорнии (1980–2019 гг.). Было показано, что в очаговой зоне, радиус которой был определен как $R = 10^{(0.43 \cdot M - 1.27)} = 54.95$ км, наблюдается статистически значимое увеличение суточного числа землетрясений в течение 15 дней после динамического воздействия за 5–20 лет до основного толчка, которое усиливается по мере его приближения. Анализ влияния 24 сильных вариаций ГМП со значениями $|dB_x/dt| \geq 50$ нТ/мин (1991–2024 гг.) на очаговые зоны всех проанализированных сильных землетрясений с магнитудой $M \geq 7.0$ также выявляет статистически значимый всплеск сейсмической активности через 2–10 дней после сильных вариаций ГМП. Таким образом, сейсмический отклик на внешние динамические и электромагнитные воздействия можно рассматривать как индикатор напряженно-деформированного состояния земной коры и указывать на местоположение будущего сильного землетрясения. Обсуждается применение полученных результатов для среднесрочного и краткосрочного прогнозирования землетрясений.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда
(проект № 26-19-00238).*

RESPONSE OF SEISMICITY OF THE EARTHQUAKE PREPARATION AREAS TO DYNAMIC AND ELECTROMAGNETIC IMPACTS

V. A. Novikov^{1,3,*}, M. V. Novikova²

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

²*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Lomonosov Moscow State University", Moscow, Russia*

³*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*Email: novikov@ihed.ras.ru

Previous studies have demonstrated the existence of electromagnetic triggering of earthquakes (EQ), including the response of microseismicity to pulsed power impacts from artificial current sources and the natural effects of strong solar flares and magnetic storms. A statistically significant increase in seismic activity of the Earth after strong solar flares (SF) of class X has been previously shown, especially in a zone with a radius of 5000 km around the subsolar point. It was assumed that EQs can be triggered by a surge in telluric currents in faults of the Earth's crust, induced by strong variations in the geomagnetic field (GMF), as a consequence of the impact of SW X-rays on the ionosphere, similar to EQ triggering by electric current pulses supplied to the Earth's crust from an artificial source. It has been shown that electromagnetic (EM) effects are most effective in aftershock areas of strong EQs, where they resulted both in an increase in the number of aftershocks and the occurrence of strong aftershocks with $M \geq 6.0$ with a delay of 6–8 days after the impact. This delay may be due to the migration of conductive fluids into fault zones, which reduces their strength, under the influence of variations in the GMF, which is confirmed by the results of an analysis of the seismicity response of fluid-saturated geothermal fields in Northern California to strong variations in the GMF $|dB_x/dt| \geq 50$ nT/min.

As a continuation of this study, a statistical analysis of the seismic activity response of the Cape Mendocino EQ focal zone (California, USA, 05.12.2024, $M = 7.0$) to the dynamic impacts of 8 distant strong earthquakes ($M \geq 7.0$) in Northern California (1980–2019) was carried out. It was shown that in the focal zone, the radius of which was determined as $R = 10^{(0.43 \cdot M - 1.27)} = 54.95$ km, a statistically significant increase in the daily number of earthquakes is observed for 15 days after the dynamic impact 5–20 years before the main shock, which increases as it approaches. An analysis of the impact of 24 strong GMF variations with values of $|dB_x/dt| \geq 50$ nT/min (1991–2024) on the focal zones of all analysed strong EQs with $M \geq 7.0$ also reveals a statistically significant spike in seismic activity 2–10 days after the strong GMF variations. Thus, the seismicity response to external dynamic and electromagnetic triggers can be considered as an indicator of the stress-strain state of the Earth's crust and indicate the location of a strong EQ. The application of obtained results for mid- and short-term EQ forecast is discussed.

ПАРАМЕТРЫ СЕРИИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В АКВАТОРИИ ЧЕРНОГО МОРЯ ВБЛИЗИ г. СОЧИ В МАРТЕ 2026 г. ПО ДАННЫМ ЛОКАЛЬНОЙ СЕТИ

М. А. Новиков^{1,2,*}, А. А. Крылов^{1,2}

¹Научно-технологический университет «Сириус», Федеральная территория Сириус, Россия

²Институт океанологии имени П. П. Ширшова Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: mihail.novikow0@gmail.com

Район г. Сочи находится вблизи сейсмолинеамента с оценкой максимальной возможной магнитуды $M_{\max} = 6.5$, что указывает на характерную для него значительную сейсмическую опасность. Вместе с тем, за весь период инструментальных наблюдений максимальная магнитуда зарегистрированного в этой зоне землетрясения составила $M_b = 5.5$, то есть в пределах района преобладали события умеренной силы. В связи с этим, особый интерес представляют серии локальных средних по силе землетрясений, позволяющие получить новую информацию о сейсмическом режиме региона.

В марте 2026 г. в акватории Черного моря в 20–25 км от г. Сочи произошла серия из трёх последовательных сейсмических событий с магнитудами более 4. Днём 3 марта были зарегистрированы два землетрясения с магнитудами $m_b = 4.4$ и 4.7 , за которыми последовала серия афтершоков. Эти события ощущались в городах Сочи, Адлере и прилегающих районах с интенсивностью 3–4 балла. Через три дня, утром 6 марта, произошло ещё одно землетрясение с магнитудой $m_b = 4.5$.

Указанные события были зарегистрированы шестью стационарными сейсмическими станциями Научно-технологического института «Сириус», расположенными на расстояниях 23–67 км от эпицентральной зоны. Пункты наблюдения оснащены широкополосными трёхкомпонентными сейсмометрами CME-6011ND с рабочим частотным диапазоном от 60 с до 50 Гц и чувствительностью 2000 В/(м/с). По данным локальной сети было выполнено уточнение положения гипоцентров рассматриваемых землетрясений, а также зарегистрированы их афтершоки.

По записям локальной сети были оценены параметры очага в рамках модели Брюна, включая моментную магнитуду, сейсмический момент, угловую частоту, размер источника и сброс напряжения. Полученные результаты позволяют более детально охарактеризовать особенности очаговых процессов для данной серии событий и уточнить представления о локальной сейсмичности района.

Следует отметить, что в 2012 г. приблизительно в той же части акватории уже было зарегистрировано землетрясение с магнитудой $m_b = 4.1$. Это может указывать на повторяемость умеренной сейсмической активности в данном участке и подчёркивает важность его дальнейшего детального мониторинга.

Результаты получены при финансовой поддержке исследования, реализуемого в рамках государственной программы федеральной территории «Сириус» «Научно-технологическое развитие федеральной территории «Сириус» (Соглашение № 18-03 от 10.09.2024).

PARAMETERS OF THE EARTHQUAKE SEQUENCE IN THE BLACK SEA WATERS NEAR SOCHI IN MARCH 2026 ACCORDING TO DATA FROM THE LOCAL NETWORK

М. А. Novikov^{1,2,*}, А. А. Krylov^{1,2}

¹Sirius University of Science and Technology, Sirius Federal Territory, Russia

²Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: mihail.novikow0@gmail.com

The Sochi area is located near a seismic lineament with an estimated maximum possible magnitude of $M_{\max} = 6.5$, indicating the high seismic hazard associated with this lineament. At the same time, throughout the entire period of instrumental observations, the maximum magnitude of an earthquake recorded in this zone was $M_b = 5.5$, meaning that moderate events have predominated within the area. In this regard, sequences of local moderate earthquakes are of particular interest, as they provide new information on the seismic regime of the region.

In March 2026, a sequence of three consecutive seismic events with magnitudes greater than 4 occurred in the Black Sea, 20–25 km from the city of Sochi. On the afternoon of March 3, two earthquakes with magnitudes $m_b = 4.4$ and 4.7 were recorded, followed by a series of aftershocks. These events were felt in Sochi, Adler, and adjacent areas with an intensity of 3–4 points. Three days later, on the morning of March 6, another earthquake with a magnitude of $m_b = 4.5$ occurred.

These events were recorded by six permanent seismic stations of the Sirius University of Science and Technology, located at distances of 23–67 km from the epicentral zone. The observation sites are equipped with broadband three-component CME-6011ND seismometers with an operating frequency range from 60 s to 50 Hz and a sensitivity of 2000 V/(m/s). Using data from the local network, the hypocenter locations of the earthquakes were refined, and their aftershocks were recorded.

Based on the local network records, the source parameters were estimated within the framework of the Brune model, including moment magnitude, seismic moment, corner frequency, source size, and stress drop. The obtained results make it possible to characterize in greater detail the features of the source processes for this sequence of events and to refine our understanding of the local seismicity of the area.

It should be noted that in 2012, an earthquake with a magnitude of $m_b = 4.1$ had already been recorded in approximately the same part of the Black Sea. This may indicate the recurrence of moderate seismic activity in this sector and underscores the importance of its further detailed monitoring.

МОНИТОРИНГ ТЕХНОГЕННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ РЕСПУБЛИКИ КОМИ

Н. Н. Носкова*, И. П. Габсатарова, З. В. Темникова

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

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

Сейсмический мониторинг Восточно-Европейской платформы и Урала выявил значительное количество сейсмических событий в районах, традиционно считающихся асейсмичными. Одной из таких территорий является северо-восток Республики Коми, включающий Полярный Урал и Предуральский краевой прогиб. Данная площадь обладает запасами минерально-сырьевых ресурсов, а разработка месторождений полезных ископаемых, как известно, создает повышенную вероятность возникновения сейсмических событий, влияющих на безопасность населения и работу предприятий.

Полярноуральский минерально-сырьевой центр включает в том числе основные промышленно освоенные и разведанные месторождения Печорского угольного бассейна. В Воркутинском углепромышленном районе Республики Коми угледобывающей компанией «ВоркутаУголь» в условиях Крайнего Севера разрабатываются три месторождения каменного угля Печорского угольного бассейна: Воркутинское – шахты «Воркутинская», «Комсомольская», «Заполярная»; Воргашорское – шахта «Воргашорская» и открытым способом на Юньягинском месторождении – угольный разрез «Юньягинский».

Сейсмический мониторинг проводится сейсмической станцией «Воркута» (VORK) Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН [1], для более сильных событий привлекаются станции региональных и международных сетей мониторинга. Для обработки сейсмических событий по данным трехкомпонентной станции VORK используется программа одностанционного детектирования и локализации NSS, являющаяся частью системы NSDL, разработанной в КоФ ФИЦ ЕГС РАН [2]. При одностанционной обработке неизбежно возникают затруднения в определении местоположения эпицентра. В нашем случае всё усложнялось тем, что сейсмические события имеют близкую локацию, обусловленную общими границами шахтных полей угольных шахт «Воркутинская», «Заполярная» и частично «Комсомольская» и сходными волновыми формами. В связи с этим, проведены исследования по кластеризации техногенных сейсмических событий. Из изучаемых данных исключены карьерные взрывы и сейсмические события, возникающие при разработке Воргашорского месторождения. Метод позволил выделить классы событий характерные для определенных шахт и провести идентификацию типа источника. Проведенные исследования позволили сформировать рекомендации для аналитиков-сейсмологов и улучшить качество сейсмического бюллетеня.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда
(проект № 25-17-00106).*

Литература

1. Носкова Н.Н., Асминг В.Э. Сейсмологические наблюдения на севере Республики Коми // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы XIX Международной сейсмологической школы / Отв. редактор А. А. Маловичко. Обнинск : ФИЦ ЕГС РАН. 2025. С. 66.
2. Асминг В.Э., Федоров А.В., Прокудина А.В., Евтюгина З.А. Автоматическая система мониторинга региональной сейсмичности NSDL. Принципы построения и некоторые результаты использования // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы XII Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А. А. Маловичко. Обнинск : ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С. 33–36.

MONITORING TECHNOGENIC SEISMIC EVENTS IN THE NORTH-EAST OF THE KOMI REPUBLIC

N. N. Noskova*, I. P. Gabsatarova, Z. V. Temnikova

Federal Research Center «Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences», Obninsk, Russia

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

Seismic monitoring of the East European Platform and the Urals has revealed a significant number of seismic events in areas traditionally considered aseismic. One such area is the northeastern Komi Republic, including the Polar Urals and the Cis-Urals foredeep. This area is rich in mineral resources, and the development of mineral deposits is known to increase the likelihood of seismic events, impacting public safety and industrial operations.

The Polar Ural mineral resource center includes the main industrially developed and explored deposits of the Pechora coal basin. In the Vorkuta coal mining region of the Komi Republic, the VorkutaUgol coal mining company is developing three coal deposits of the Pechora coal basin in the Far North: the Vorkutskoe deposit, comprising the Vorkutinskaya, Komsomolskaya, and Zapolyarnaya mines; The Vorgashorskoye deposit is operated by the Vorgashorskaya mine and the Yunyaginsky open-pit coal mine at the Yunyaginskoye deposit.

Seismic monitoring is conducted by the «Vorkuta» (VORK) seismic station at the Institute of Geology of the Komi Scientific Center Ural Branch of the RAS. For more intense events, stations from regional and international monitoring networks are used. Seismic event data from the three-component VORK station is processed using the NSS single-station detection and location program, which is part of the NSDL system developed at the Kola Branch of Geophysical Survey RAS. Single-station processing inevitably poses difficulties in determining the epicenter location. In our case, the situation was complicated by the close proximity of the seismic events due to the shared boundaries of the mine fields of the Vorkutinskaya, Zapolyarnaya, and partially Komsomolskaya coal mines, as well as similar waveforms. In this regard, studies were conducted to cluster man-made seismic events. Open-pit explosions and seismic events occurring during the development of the Vorgashorskoye deposit were excluded from the data analyzed. This method allowed us to identify event classes characteristic of specific mines and identify the source type. The conducted studies allowed us to formulate recommendations for seismic analysts and improve the quality of seismic bulletins.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ЗЕРНА ЦИРКОНА В СДВИГОВОЙ ПОЛОСЕ: ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

А. А. Остапчук, Б. А. Иванов*

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

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

Изучение горных пород, эксгумированных с глубин, где литостатическое давление достигает 4–6 ГПа в настоящее время является важным источником информации о деформационных процессах, протекающих в земной коре. Зерна цирконов, локализованные в зонах сейсмогенных подвижек, во многих случаях содержат трещины, образованные при сдвиге окружающих пород. В данной работе мы представляем первые численные расчеты разрушения циркона в процессе сдвиговой деформации окружающего материала, заполняющего разлом.

Расчеты проводились по программе SALEB в двумерной (плоской) постановке. Пробные расчеты были проведены для однородной области прямоугольного сечения, заполненной модельным «цирконом».

Образец без бокового подпора стоял на несжимаемом основании и нагружался верхним несжимаемым «поршнем». Трение на верхней и нижней площадках предполагалось нулевым. Разрушающая нагрузка модельного «циркона» при одноосном нагружении без бокового подпора в плоском случае составляет около 1.5 ГПа. Это несколько больше, чем дифференциальное напряжение в трехмерном эксперименте, где сообщалось о максимальной разности главных напряжений ~ 0.4 ГПа.

Модель поведения кристалла циркона в сдвиговой полосе включала прямоугольную область расчетной сетки длиной 200 или 400 ячеек и высотой 100 ячеек. Верхняя и нижняя границы перемещались без скольжения. Левая и правая границы перемещались внешними силами, которые обеспечивали сдвиговую нагрузку в горизонтальном направлении. Ячейки в центральной части модельного объема (30×30 , 40×40 или 60×60 ячеек) заполнялись материалом со свойствами модельного циркона. Остальные ячейки заполнялись модельным «гранитом».

В простейшей плоской Лагранжевой постановке воспроизведено запаздывание разрушения зерна циркона относительно материала – заполнителя разлома. Продемонстрирована возможность «выживания» зерна циркона при сдвиговой деформации окружающего материала ~ 0.5 .

*Работа выполнена в рамках темы государственного задания № 125012700824-4
"Деформационные процессы, локализованные на границах тектонических блоков разных
иерархических уровней – физические механизмы, предвестники, методы контроля и
предупреждения"*

NUMERICAL MODELING OF A ZIRCON GRAIN DEFORMATION IN A SHEAR BAND – PRELIMINARY RESULTS

A. A. Ostapchuk, B. A. Ivanov*

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

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

The study of rocks exhumed from depths, where the lithostatic pressure reaches 4–6 GPa, is currently an important source of information and deformation processes occurring in the Earth's crust. Zircon grains localized in the zones of seismogenic movements in many cases contain cracks formed during the shear of the surrounding rocks. In this paper, we present the first numerical calculations of zircon destruction in the process of shear deformation of the surrounding material filling the fault.

The calculations were carried out using the SALEB program in a two-dimensional (planar) setting. Trial calculations were carried out for a homogeneous area of rectangular cross-section filled with model «zircon». The specimen without side support stood on an incompressible base and was loaded with an upper incompressible «piston». Friction on the upper and lower platforms was supposed to be zero. The destructive load of the model «zircon» under uniaxial loading without lateral support in the planar case is about 1.5 GPa. This is slightly higher than the differential stress in the three-dimensional experiment, where a maximum principal stress difference of ~ 0.4 GPa was reported.

The model to load a zircon crystal in the shear band includes a rectangular area of the computational mesh with a length of 200 or 400 cells and a height of 100 cells. The upper and lower boundaries moved without slipping. The left and right boundaries were moved by external forces that provided a shear load in the horizontal direction. The cells in the central part of the model volume (30×30 , 40×40 or 60×60 cells) were filled with a material with the properties of model zircon. The rest of the cells were filled with model «granite».

In the simplest 2D Lagrangian formulation, the delay in the destruction of the zircon grain relative to the material – the fracture filler – is reproduced. The possibility of «survival» of zircon grain at a shear band deformation ~ 0.5 is demonstrated.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ЗОНЫ СУБДУКЦИИ

А. А. Остапчук¹, И. И. Нугманов^{1,2,*}, К. Г. Морозова¹, О. В. Бергаль-Кувикас^{3,4}

¹Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

²Университет Иннополис, Иннополис, Россия

³Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

⁴Камчатский государственный университет им. В. Беринга, Петропавловск-Камчатский, Россия

*E-mail: i.nugmanov@innopolis.ru

Эволюция тектонических разломов и локализация очагов сильнейших землетрясений определяются конфигурацией тектонических зацепов (зоны асперити): участков интерфейса с высокой фрикционной прочностью. В работе на основе анализа региональных (Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН) и глобальных (каталог Геологической службы США NEIC) сейсмических данных за период 1990–2025 гг. проведено уточнение структурной модели Курило-Камчатской зоны субдукции (ККЗС). Для картирования структуры межплитного контакта применен алгоритм SPAD, выделяющий сейсмогенные пятна (сейсмопятна): топологически плотные пространственные группы фоновой сейсмичности. В пределах ККЗС идентифицированы устойчивые конфигурации сейсмопятен размером 150–350 км. Установлено, что пространственная локализация этих структур часто коррелирует с геометрическими неоднородностями слэба, трансформными разломами (клавишно-блоковая модель) погружающейся Тихоокеанской плиты. Эволюционная динамика охарактеризована с привлечением сведений по триггерным изменениям параметров сейсмичности: проведен расчет и анализ корреляционной размерности, учитывающей локализацию связанных событий; скейлингового параметра; амплитуды смещения, реализуемого на отдельном сейсмопятне согласно эмпирической связи с величиной кумулятивного сейсмического момента. Кроме того, проведено сопоставление полученной конфигурации сейсмопятен, полученных исключительно в результате анализа сейсмических каталогов с результатами численного моделирования смещений и сейсмического момента по результатам инверсии волновых форм, данных геодезических сетей и космической радарной интерферометрии. Обобщение данных по Камчатскому и Курильскому сегментам позволяет сформировать уточненную сегментацию зоны субдукции. Предложенный подход доказывает, что анализ мезоструктуры фоновой сейсмичности позволяет выявлять зоны концентрации напряжений без использования априорных данных о сильных событиях, что критически важно для оценки сейсмической опасности и понимания механизмов перехода от медленного накопления деформаций к динамическому разрыву.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания № 125012700824-4

"Деформационные процессы, локализованные на границах тектонических блоков разных иерархических уровней – физические механизмы, предвестники, методы контроля и предупреждения"

USING SEISMOLOGICAL DATA TO REFINE THE STRUCTURAL MODEL OF THE KURIL-KAMCHATKA SUBDUCTION ZONE

A. A. Ostapchuk¹, I. I. Nugmanov^{1, 2, *}, K. G. Morozova¹, O. V. Bergal-Kuvikas^{3, 4}

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

²*Innopolis University, Innopolis, Russia*

³*Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

⁴*Vitus Bering Kamchatka State University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

* E-mail: i.nugmanov@innopolis.ru

The evolution of tectonic faults and the localization of the sources of the strongest earthquakes are determined by the configuration of tectonic asperities: interface patches with high frictional strength. In this study, the structural model of the Kuril-Kamchatka subduction zone (KKSZ) was refined based on the analysis of regional (Kamchatka Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences) and global (USGS NEIC) seismic data for the period 1990–2025. To map the structure of the interplate contact, the SPAD algorithm was applied, which detects seismogenic patches: topologically dense spatial clusters of background seismicity. Within the KKSZ, stable configurations of seismogenic patches ranging in size from 150 to 350 km have been identified. It has been established that the spatial localization of these structures often correlates with the geometric heterogeneities of the slab and transform faults (the key-block model) of the subducting Pacific plate. The evolutionary dynamics are characterized by incorporating data on triggered changes in seismicity parameters. We calculated and analyzed the correlation dimension, taking into account the localization of clustered events; the scaling parameter (b-value); and the slip amplitude realized on an individual seismogenic patch according to its empirical relationship with the cumulative seismic moment. Furthermore, the configuration of seismogenic patches, obtained exclusively through the analysis of seismic catalogs, was compared with the results of numerical modeling of displacements and seismic moment based on waveform inversion, geodetic network data, and spaceborne radar interferometry (InSAR). The generalization of data on the Kamchatka and Kuril segments allows for the formulation of a refined segmentation of the subduction zone. The proposed approach proves that the analysis of the mesostructure of background seismicity makes it possible to identify stress concentration zones without relying on a priori data on strong events. This is critically important for seismic hazard assessment and for understanding the mechanisms of the transition from slow strain accumulation to dynamic rupture.

ИНИЦИИРОВАНИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ЗОНАХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ РАЗЛОМОВ

А. А. Остапчук*, Д. В. Павлов, А. М. Будков

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

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

Коровые землетрясения реализуются в виде быстрого фрикционного скольжения по тектоническим разломам, при котором излучаются высокоамплитудные упругие колебания. Очагом землетрясения является зона тектонического контакта, которая сложена породами со свойством скоростного разупрочнения и характеризуется высоким коэффициентом трения. Косейсмическое скольжение локализуется преимущественно в пределах одного сегмента разлома и одного тектонического контакта.

Разработана двухстадийная модель формирования очага землетрясения. В процессе долговременного нагружения разлома в области тектонического контакта аккумулируются напряжения и увеличивается дефицит смещения. При достижении напряжениями локальной прочности разлома в зоне тектонического контакта инициируется медленное скольжение, которое распространяется от границы очага землетрясения вдоль всей его площади. В момент, когда медленное скольжение охватывает всю площадь, инициируется фрикционное скольжение. В том случае, если реологическая жесткость разлома значительно больше жесткости окружающего массива, то медленное скольжение трансформируется в быстрое скольжение, при котором излучается высокоамплитудный сейсмический импульс.

Медленное скольжение может являться как неотъемлемой составляющей формирования быстрого скольжения, так и независимым событием. Реализация событий медленного скольжения является характерным для сегментов разломов со сложной пространственной конфигурацией тектонических контактов и пространственной неоднородностью фрикционных свойств осевой зоны разлома вдоль его простираения. При реализации независимых событий медленного скольжения регистрируются рои сейсмических событий, для которых характерно логнормальная статистика временных задержек между импульсами.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 22-17-00204-П «Геомеханика разломов земной коры – от региональных масштабов до микротрещин»).

EARTHQUAKE BEGINNING ON THE TECTONIC FAULT

A. A. Ostapchuk*, D. V. Pavlov, A. M. Budkov

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

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

Crustal earthquakes are realized via fast frictional slip along tectonic faults, which accompanied by high-amplitude elastic vibrations. The earthquake source is a tectonic asperity, which is characterized by velocity-weakening friction and high coefficient of friction. Coseismic slip is localized mainly within one fault segment and one tectonic asperity.

We present a two-stage model of earthquake nucleation. During the long-term loading of the tectonic fault, stresses accumulate in the vicinity of tectonic asperity and a slip deficit increases. When the stresses reach the local strength of the fault, slow slip is initiated, which spreads from the boundary of the earthquake source along its entire area. At the moment when the slow slip covers the entire source, a frictional slip is initiated. If rheological stiffness of the fault is significantly greater than the stiffness of the surrounding rock massif, slow slip transforms into fast rupture, accompanied high-amplitude seismic pulse.

Slow slip can be both an integral component of the nucleation of fast earthquake rupture, and an independent event. The realization of slow-slip events is characteristic of fault segments with uneven spatial configuration of tectonic asperities and spatial heterogeneity of the frictional properties of the fault interface. When independent slow-slip events are realized, seismic swarm is recorded, which are characterized by lognormal statistics of time delays between pulses.

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ (НА ПРИМЕРЕ КЫРГЫЗСТАНА)

С. Ж. Орунбаев*, М. В. Родкин

Центрально-Азиатский институт прикладных исследований Земли, Бишкек, Кыргызская Республика
*E-mail: s.orunbaev@gmail.com

Кыргызстан расположен в одной из сейсмоактивных областей. Оценка сейсмической безопасности базируется на решении комплекса задач: оценке величины и повторяемости сейсмических воздействий, оценке грунтовых условий, оценке уязвимости социо-техносферы. Ни одна из этих проблем окончательно не решена. Оценка сильнейших воздействий затрудняется малой длительностью сейсмических каталогов. Инструментальная оценка грунтовых условий хорошо решается локально, но эти методы трудоемки и ими нельзя покрыть значительные площади. Оценка уязвимости предполагает учет изменений как в практике строительства, так и изменения экологических факторов (обводненности, характера землепользования). Пример Гиссарского землетрясения (1989 г., Таджикистан) показывает, что даже не сильное событие ($M = 5.2$) на обводненных лессовых грунтах может вызвать катастрофические оползни и разжижение. Для Кыргызстана, где зоны высокой сейсмичности совпадают с областями распространения лессов и активно меняющимся водным режимом, такой сценарий актуален. Ниже даны подходы к решению этих вопросов на примере Кыргызстана.

В условиях недостатка инструментальных и исторических сейсмических данных важную роль играют геологические и палеосейсмологические методы оценки параметров сильных землетрясений за большие интервалы времени. Метод выявления и интерпретации смещений скальных блоков позволяет оценивать максимальные уровни прошлых сейсмических воздействий. Применение этого подхода позволило расширить временной диапазон для оценки сейсмической опасности в Алайской и Нарынской долине. Другим источником информации о сильных землетрясениях прошлого являются донные отложения горных озёр. Исследование донных осадков озера Сары-Челек показало, что осадочная последовательность прерывается событийными слоями турбидитов и деформированных осадков. Эти структуры формируются в результате подводных оползней, обрушений склонов и разжижения осадков при сильных землетрясениях. Анализ кернов донных осадков позволил установить возраст таких событийных слоев, в частности, двух последних, отвечающих сильным землетрясениям магнитудой $M_{\text{ЛН}} \approx 7.5$: Чаткальскому 1946 г. и Суусамырскому 1992 г. Такое совпадение показывает, что озёрные осадки могут служить хорошим регистратором сейсмической активности, позволяющим реконструировать историю сильных землетрясений за длительные периоды времени.

Также важен учет изменения социально-экономических и геоэкологических (обводнение грунтов, деградация мерзлоты) условий, что особенно существенно в виду быстрого изменения социально-экономических и природных условий (среди прочего, инициируемых изменениями климата). Методы микросейсмического зондирования и вертикального электрического зондирования использовались для картирования грунтовых условий и уровней грунтовых вод (города Бишкек, Нарын, плотина Курпсай). Мониторинг плотины Курпсай выявил наличие отклика от сезонных изменений температуры и уровня воды. В северной части Бишкека установлено, что подъем уровня грунтовых вод (вследствие ирригации и климатических изменений) ведет к снижению несущей способности лессовых грунтов и увеличению риска подтопления. Обводнение лессовых толщ мощностью 50–150 м многократно усиливает сейсмический эффект. Дополнительные данные дает анализ спутниковых данных (NDVI) для оценки связи изменений растительности и водного режима.

Характер сейсмического ущерба в Кыргызстане в ближайшие десятилетия будет определяться не только собственно характером сейсмичности, но и динамикой геоэкологических условий (обводнение грунтов) и изменением уязвимости застройки. В этой связи актуален переход от статических карт сейсмической опасности к динамическим сценариям риска, интегрирующим данные мониторинга грунтовых вод, климатические прогнозы и актуальные характеристики зданий.

AN INTEGRATED APPROACH TO ASSESSING SEISMIC HAZARD, TAKING INTO ACCOUNT CHANGES IN GEOECOLOGICAL CONDITIONS (KYRGYZSTAN AS AN EXAMPLE)

S. Z. Orunbaev*, M. V. Rodkin

Central Asian Institute Applied Gesciences, Bishkek, Kyrgyz Republic

**E-mail: s.orunbaev@gmail.com*

Kyrgyzstan is located in one of the most seismically active regions of Central Asia. Assessing seismic safety requires addressing several interconnected tasks: estimating the magnitude and recurrence of seismic impacts, evaluating local ground conditions, and assessing the vulnerability of the socio-technical environment. None of these issues has been fully resolved. The evaluation of the strongest seismic impacts is constrained by the relatively short duration of instrumental and historical earthquake catalogs. Although instrumental methods allow accurate assessment of ground conditions at local sites, they are labor-intensive and cannot easily be applied over large areas. At the same time, vulnerability assessments must consider changes in construction practices as well as environmental factors such as groundwater conditions and land-use changes. The example of the 1989 Gissar earthquake in Tajikistan illustrates this challenge: despite its moderate magnitude ($M = 5.2$), the event triggered catastrophic landslides and soil liquefaction in water-saturated loess deposits. In Kyrgyzstan, where highly seismic zones coincide with extensive loess formations and changing hydrological conditions, such scenarios remain highly relevant.

In the absence of long instrumental and historical records, geological and paleoseismological methods are important for reconstructing parameters of strong earthquakes over longer time intervals. One such method involves identifying and interpreting displaced precariously balanced rock blocks, which allows estimation of maximum ground motions produced by past seismic events. Application of this approach has extended the time horizon for seismic hazard assessment in the Alai and Naryn valleys.

Another valuable archive of past seismic activity is preserved in the sedimentary records of mountain lakes. Studies of bottom sediments in Lake Sary-Chelek reveal event layers such as turbidites and deformed deposits formed by underwater landslides, slope failures, and sediment liquefaction triggered by strong earthquakes. Analysis of sediment cores identified layers corresponding to two strong earthquakes with magnitudes of approximately $MLH \approx 7.5$: the 1946 Chatkal earthquake and the 1992 Suusamyr earthquake. This demonstrates that lacustrine sediments can serve as reliable natural archives for reconstructing long-term seismic histories.

Ongoing socio-economic and geoenvironmental changes must also be considered. Rising groundwater levels, land-use changes, and climate-related processes can significantly influence ground stability. Geophysical methods, including microseismic sounding and vertical electrical sounding, have been applied to map subsurface conditions and groundwater levels in Bishkek, Naryn, and at the Kurpsai dam. Monitoring at the Kurpsai dam shows responses to seasonal variations in temperature and water levels. In northern Bishkek, groundwater rise—partly due to irrigation and climate change—reduces the bearing capacity of loess soils and increases flooding risks.

Future seismic damage in Kyrgyzstan will depend not only on seismic activity but also on evolving environmental conditions and the vulnerability of the built environment. Therefore, there is a need to move from static seismic hazard maps toward dynamic risk assessment approaches integrating environmental monitoring, climate projections, and updated building data.

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОПОЛЗНЕВОЙ АКТИВНОСТИ НА ЮГЕ КЫРГЫЗСТАНА

С. Ж. Орунбаев*, Б. Мурзали

Центрально-Азиатский институт прикладных исследований Земли, Бишкек, Кыргызская Республика

**E-mail: s.orunbaev@gmail.com*

Кыргызстан, особенно южные регионы, относятся к числу наиболее подверженных оползневым процессам территорий Центральной Азии. Сложные геологические условия, активная тектоника, большая расчлененность рельефа, интенсивные сезонные осадки и антропогенное воздействие способствуют формированию и активизации оползней и скальных лавин. Особенно уязвимой является территория Ошской, Джалал-Абадской и Баткенской областей, где такие процессы ежегодно представляют серьезную угрозу для населённых пунктов, сельскохозяйственных угодий и инфраструктуры. В условиях изменения климата, сопровождающегося увеличением экстремальных гидрометеорологических явлений, проблема оценки и прогнозирования оползневой активности приобретает особую актуальность.

Целью данного исследования является разработка подходов к комплексной оценке и прогнозированию оползневой активности в Кыргызстане с использованием современных геоинформационных технологий, дистанционного зондирования Земли. Основное внимание уделяется выявлению факторов, влияющих на формирование оползней и скальных лавин, анализу их пространственно-временного распределения, развитию моделей возникновения и развития этих процессов.

В рамках исследования проводится анализ многолетних данных о зарегистрированных оползнях и обвалах, изучение ключевых природных и антропогенных факторов, влияющих на их формирование. К таким факторам относятся геологическое строение, литологический состав пород, уклон и экспозиция склонов, высота над уровнем моря, расстояние до водотоков, уровень грунтовых вод, а также характер землепользования. Дополнительно учитываются климатические параметры, такие как интенсивность и продолжительность осадков, температурные колебания и режим сезонного таяния снега.

Для оценки оползневой опасности используются данные дистанционного зондирования Земли, включая спутниковые снимки высокого разрешения и цифровые модели рельефа. На основе этих данных формируются тематические геопространственные слои, которые интегрируются в геоинформационной системе для проведения пространственного анализа. Применение методов статистического анализа и машинного обучения позволяет выявить взаимосвязи между факторами окружающей среды и вероятностью возникновения оползней.

Важным этапом исследования является разработка прогностических карт оползневой опасности, отражающих степень вероятности активизации оползневых процессов на различных участках территории. Такие карты могут служить основой для систем раннего предупреждения и поддержки принятия решений в области управления рисками природных катастроф. Они также могут быть использованы органами местного самоуправления и государственными структурами при планировании землепользования, строительстве инфраструктуры и разработке мероприятий по снижению риска стихийных бедствий.

Ожидается, что результаты исследования позволят повысить эффективность мониторинга и прогнозирования оползневых процессов в южных регионах Кыргызстана. Комплексный подход, основанный на интеграции данных дистанционного зондирования, геоинформационных технологий и современных аналитических методов, создаёт научную основу для более точной оценки оползневых рисков и разработки стратегий адаптации к природным угрозам. В долгосрочной перспективе это будет способствовать снижению социально-экономических потерь и повышению устойчивости местных сообществ к природным опасностям.

ASSESSMENT AND FORECASTING OF LANDSLIDE ACTIVITY IN SOUTHERN KYRGYZSTAN

S. Z. Orunbaev*, B. Murzali

Central Asian Institute Applied Gesciences, Bishkek, Kyrgyz Republic

**E-mail: s.orunbaev@gmail.com*

Kyrgyzstan, particularly its southern regions, is among the most landslide-prone areas in Central Asia. Complex geological conditions, active tectonics, highly rugged terrain, intense seasonal precipitation, and anthropogenic impacts contribute to the formation and intensification of landslides and rock avalanches. Particularly vulnerable are the Osh, Jalal-Abad, and Batken regions, where such processes annually pose a serious threat to settlements, agricultural land, and infrastructure. In the context of climate change, accompanied by an increase in extreme hydrometeorological events, the problem of assessing and predicting landslide activity is particularly relevant.

The aim of this study is to develop approaches to comprehensively assessing and predicting landslide activity in Kyrgyzstan using modern geoinformation technologies and remote sensing. The focus is on identifying factors influencing the formation of landslides and rock avalanches, analyzing their spatiotemporal distribution, and developing models for the occurrence and development of these processes. The study analyzes long-term data on recorded landslides and rockfalls, examining the key natural and anthropogenic factors influencing their formation. These factors include geological structure, lithological composition, slope slope and aspect, elevation, distance to watercourses, groundwater level, and land use patterns. Climate parameters, such as precipitation intensity and duration, temperature fluctuations, and seasonal snowmelt patterns, are also considered.

Landslide hazard assessments utilize remote sensing data, including high-resolution satellite images and digital elevation models. These data are used to create thematic geospatial layers, which are integrated into a geographic information system for spatial analysis. Statistical analysis and machine learning methods help identify relationships between environmental factors and the likelihood of landslide occurrence.

An important stage of the study is the development of landslide hazard prognostic maps, reflecting the likelihood of landslide activation in various areas. These maps can serve as the basis for early warning systems and decision support for natural disaster risk management. They can also be used by local governments and state agencies in land use planning, infrastructure construction, and the development of disaster risk reduction measures.

The study's results are expected to improve the effectiveness of landslide monitoring and forecasting in the southern regions of Kyrgyzstan. A comprehensive approach based on the integration of remote sensing data, geoinformation technologies, and modern analytical methods provides a scientific basis for more accurate landslide risk assessment and the development of adaptation strategies to natural hazards. In the long term, this will help reduce socioeconomic losses and increase the resilience of local communities to natural hazards.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАЗРЫВА В ЛАБОРАТОРНОЙ МОДЕЛИ СЕЙСМОГЕННОГО РАЗЛОМА МЕТРОВОГО МАСШТАБА С НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРОЙ

Д. В. Павлов*, И. С. Харламов

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: dpav123@mail.ru*

Будут представлены результаты экспериментов, проводящихся в настоящее время в ИДГ РАН на установке двухосного нагружения РАМА. Будет рассмотрен процесс зарождения и распространения разрыва в модели разлома размером $75 \times 12 \times 0.4$ см, состоящей из пяти чередующихся участков, заполненных материалами со свойствами скоростного упрочнения и разупрочнения. В качестве материала со свойством скоростного упрочнения используется смесь бентонитовой глины, песка и цемента; материал со свойством скоростного разупрочнения представлен смесью гранитной крошки, песка и цемента. Регистрация параметров движения в разных частотных диапазонах ведётся лазерными датчиками смещения (0–5 кГц), акселерометрами (1–15 кГц) и датчиками акустической эмиссии (20–80 кГц).

Цель настоящих экспериментов – исследовать, как смещается точка старта разрыва в зависимости от положения участков со свойством скоростного разупрочнения в модели разлома. Предполагается, что разрыв стартует на границе такого участка. Именно к такому результату привели ранее проводившиеся эксперименты на этой же установке. В ранее проведенной серии модель тектонического зацепа (асперити) имела площадь 40×10 см и располагалась в центре рабочего интерфейса. Остальная часть рабочего интерфейса была заполнена вкладышем, выполненным из листа тефлона толщиной 4 мм. Увеличение площади модели тектонического зацепа до площади всего рабочего интерфейса (75×12 см) позволяет поднять разрешение локации разрыва и использовать модель с неоднородной структурой.

Работа выполняется в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема 125012700824-4).

PROPAGATION OF RUPTURE IN A LABORATORY MODEL OF SEISMOGENIC FAULT OF A METER SCALE WITH A HETEROGENEOUS STRUCTURE

D. V. Pavlov*, I. S. Kharlamov

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

**E-mail: dpav123@mail.ru*

The results of experiments currently being conducted in IDG RAS at the RAMA biaxial loading setup will be presented. The process of rupture initiation and propagation will be studied at a $75 \times 12 \times 0.4$ cm fault model consisting of five alternating sections filled with materials exhibiting velocity strengthening and velocity weakening properties. A mixture of bentonite clay, sand, and cement is used as the velocity strengthening material, while a mixture of granite crumbs, sand, and cement serves as the velocity weakening material. Parameters of motion are recorded in different frequency ranges using laser displacement sensors (0–5 kHz), accelerometers (1–15 kHz), and acoustic emission sensors (20–80 kHz).

The goal of these experiments is to determine how the rupture initiation point displaces depending on the position of the velocity weakening sections in the fault model. It is assumed that the rupture originates precisely at the boundary of such a section. This is the result obtained in previous experiments conducted at the same setup. In the previous series, the model of tectonic asperity had an area of 40×10 cm and was located in the center of the working interface. The rest of the working interface area was filled with a teflon plate 4 mm thick. Increasing the area of the tectonic asperity model to the area of the entire working interface (75×12 cm) will improve the resolution of rupture location and allow to use a model with a heterogeneous structure.

АПРОБАЦИЯ МЕТОДОВ ТЕОРИИ ЭФФЕКТИВНЫХ СРЕД ДЛЯ ОЦЕНКИ УПРУГИХ СВОЙСТВ СИЛЬВИНИТА ПО ДАННЫМ РЕНТГЕНОВСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

И. А. Пантелеев^{1, *}, А. А. Барях², Д. В. Ложкин¹

¹Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия

²Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия

*E-mail: pia@icmm.ru

Настоящая работа посвящена комплексному анализу деформационных характеристик и интегральных параметров микротрещиноватости в образцах красного сильвинита Верхнекамского месторождения солей при циклическом одноосном сжатии с постепенным увеличением максимальной нагрузки от цикла к циклу. Для оценки плотности и объёмной доли микротрещин до испытаний и после каждого цикла осуществлялась микротомографическая съёмка образцов на рентгеновском томографе Skyscan 1272 Bruker. Пространственное разрешение томографических изображений (размер ребра вокселя) составило 12 мкм. В результате анализа кривых деформирования установлена зависимость нормированного касательного модуля деформации красного сильвинита от величины максимальной нагрузки в цикле.

Анализ КТ данных показал, что объёмная доля микротрещин с величиной максимальной нагрузки в цикле растёт нелинейно, заметные изменения имеют место после нагрузки 10 МПа. Средняя объёмная плотность микротрещин после завершения испытаний составляет 1.6%. Показано, что изменение среднего нормированного касательного модуля деформации красного сильвинита линейно связано с изменением средней объёмной доли микротрещин. Для оценки плотности микротрещин по КТ данным как интегрального параметра, широко используемого в теории эффективных сред, предложено два подхода. Первый подход базируется на определении плотности микротрещин через их максимальный размер, второй – на определении плотности микротрещин через радиус монетообразных трещин эквивалентного объёма и площади поверхности. Показано, что до максимальной нагрузки 10 МПа оба подхода дают незначительный рост плотности микротрещин. Далее, плотность микротрещин, оцененная по первому способу, возрастает квазилинейно с ростом максимальной нагрузки в цикле, а плотность микротрещин, оцененная по второму способу – нелинейно.

Экспериментальные данные по изменению среднего нормированного касательного модуля деформации красного сильвинита и интегральных характеристик микротрещиноватости были использованы для верификации и сравнительного анализа различных методов теории эффективных сред. Построены зависимости нормированного эффективного модуля Юнга от максимальной нагрузки в цикле с использованием методов Мори–Танака, дифференциального метода эффективной среды и метода самосогласования. Установлено, что дифференциальный метод эффективной среды и метод самосогласования с оценкой плотности трещин по первому способу дают заниженные оценки среднего эффективного нормированного модуля Юнга, начиная уже с умеренных нагрузок, а метод Мори–Танака – завышенные оценки. Показано, что самосогласованный метод с оценкой плотности микротрещин через радиус эквивалентных монетообразных трещин даёт приемлемые оценки эффективного нормированного модуля Юнга (погрешность для средних величин не превышает 10%) для плотности микротрещин не превышающей 0.5.

Полученные результаты могут быть использованы при определении несущей способности ленточных и столбчатых целиков в части развития техногенной нарушенности, что позволит более достоверно оценивать их устойчивость. Установлен порог максимальной действующей нагрузки (10 МПа) после которого активизируется процесс неупругого деформирования соляных междукламерных целиков. Вопрос о влиянии формы образцов, масштабного фактора и вида напряженно-деформированного состояния на полученные результаты остается открытым и является предметом дальнейших исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 26-97-20006).

APPLICATION OF EFFECTIVE MEDIUM THEORY METHODS FOR ESTIMATING THE ELASTIC PROPERTIES OF SYLVINITE BASED ON X-RAY COMPUTED TOMOGRAPHY DATA

I. A. Panteleev^{1,*}, A. A. Baryakh², D. V. Lozhkin¹

¹*Institute of Continuum Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia*

²*Minning institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia*

*E-mail: pia@icmm.ru

This work is devoted to a comprehensive analysis of the deformation characteristics and integral parameters of microcracking in samples of red silvinites from the Verkhnekamsk salt deposit under cyclic uniaxial compression with a gradual increase in maximum load from cycle to cycle. To assess the density and volume fraction of microcracks before testing and after each cycle, microtomography of samples was performed using a Skyscan 1272 Bruker X-ray tomograph. The spatial resolution of the tomographic images (voxel edge size) was 12 microns.

The analysis of CT data showed that the volume fraction of microcracks with the maximum load in the cycle increases non-linearly, noticeable changes occur after a load of 10 MPa. The average volume density of microcracks after completion of the tests is 1.6%. It is shown that the change in the average normalized tangential modulus of deformation of red silvinites is linearly related to the change in the average volume fraction of microcracks. Two approaches have been proposed to estimate microcrack density from CT data as an integral parameter widely used in the theory of effective media. The first approach is based on determining the density of microcracks through their maximum size, the second is based on determining the density of microcracks through the radius of coin-shaped cracks of equivalent volume and surface area. It is shown that up to a maximum load of 10 MPa, both approaches result in a slight increase in microcrack density. Further, the microcrack density estimated by the first method increases quasi-linearly with increasing maximum load in the cycle, and the microcrack density estimated by the second method increases non-linearly.

Experimental data on the change in the average normalized tangential modulus of deformation of red silvinites and the integral characteristics of microcracking were used for verification and comparative analysis of various methods of the theory of effective media. The dependences of the normalized effective Young's modulus on the maximum load in the cycle are constructed using the Mori-Tanaka methods, the differential effective medium method, and the self-consistency method. It has been found that the differential effective medium method and the self-consistency method with the crack density estimate using the first method give underestimated estimates of the average effective normalized Young's modulus, starting with moderate loads, and the Mori-Tanaka method overestimate estimates. It is shown that a self-consistent method with estimating the microcrack density through the radius of equivalent coin-shaped cracks provides acceptable estimates of the effective normalized Young's modulus (the error for average values does not exceed 10%) for microcrack densities not exceeding 0.5.

The results obtained can be used to determine the bearing capacity of ribbon and columnar pillars in terms of the development of anthropogenic disturbance, which will allow for a more reliable assessment of their stability.

**ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРИГГЕРНОЙ АКТИВИЗАЦИИ РАЗЛОМНЫХ ЗОН:
УПРАВЛЕНИЕ ЦИКЛИЧЕСКИМИ НАГРУЗКАМИ И РЕГИСТРАЦИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

А. В. Патонин*, Н. М. Шихова

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

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

В современных исследованиях триггерных эффектов в геосистемах недостаточно внимания уделяется количественной оценке роли слабых повторяющихся напряжений – таких как приливные силы, сезонные колебания уровня грунтовых вод или техногенные вибрации. Эти воздействия, величина которых менее 30% от предела прочности горных пород, тем не менее, могут инициировать кумулятивное накопление микроповреждений и последующую активизацию разломных зон. Основная сложность экспериментального изучения подобных процессов заключается в необходимости воспроизведения слабо амплитудных циклических нагрузок при одновременном контроле всестороннего и порового давлений и регистрации микросейсмических событий с высоким временным разрешением.

В работе представлена лабораторная установка на базе управляемого сервогидравлического пресса Inova, используемая для моделирования триггерной активизации разломов под действием слабых циклических напряжений. Ключевым элементом служит программно-аппаратный комплекс на базе микроконтроллера Arduino Mega-2560, обеспечивающий гибкое управление режимами нагружения. Система позволяет реализовывать циклические осевые нагрузки заданной амплитудой при всестороннем давлении до 140 МПа и поровым давлением до 70 МПа, создаваемом независимыми насосами высокого давления. Особенностью установки является наличие адаптивного управления по параметрам акустической эмиссии (АЭ): при превышении заданных значений амплитуды или частоты событий АЭ система автоматически снижает скорость нагружения, что предотвращает неконтролируемое разрушение образца, позволяя тем самым фиксировать критические переходы в структуре материала.

Для регистрации микроразрушений используется система из 16 пьезоэлектрических датчиков, равномерно распределённых вокруг цилиндрического образца диаметром 30 и высотой 60 мм. Такая конфигурация обеспечивает трёхмерную локацию источников АЭ с точностью ~ 2 мм и позволяет определять, в том числе, и механизм каждого события по оригинальной методике AESAM+ISO [1].

Для отладки методики формирования магистрального разрыва проведена серия испытаний на различных видах песчаников, отличающихся средними размерами зерен и степенью цементации. Реализуемые в эксперименте циклические нагрузки амплитудой до 70 МПа при всестороннем давлении до 30 МПа моделировали природные триггерные воздействия на глубинах 1–3 км: приливные деформации земной коры, сезонные колебания порового давления и фоновые микросейсмические колебания. При этом квазистатический режим нагружения со скоростью 0.01–0.1 МПа/с позволил отделить процессы накопления повреждений от динамического разрушения, что критично для изучения триггерного эффекта. Эксперименты проходили при наличии небольшого циклического воздействия как на стадии формирования магистрального разрыва, так и на этапе скольжения берегов сформированного разрыва. Максимальное напряжение в циклах не превышало 40–50% от предела прочности исследованных песчаников при заданном всестороннем давлении, что позволяет рассматривать циклическое воздействие как слабые триггерные возмущения, аналогичные приливным деформациям в природных условиях.

В ходе испытаний проводилась непрерывная запись волновых форм сигналов акустической эмиссии. На этапе последующей обработки выполнено детектирование и параметризация событий АЭ, что позволило сформировать каталоги и бюллетени акустических событий.

*Работа выполнена в рамках госзадания ИФЗ РАН в Центре коллективного пользования
«Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм» ИФЗ РАН.*

Литература

1. Shikhova N., Patonin A. Methods for determining focal mechanisms in laboratory experiments. EGU General Assembly 2021. EGU21-3305.

LABORATORY MODELING OF TRIGGER ACTIVIZATION OF FRACTURED ZONES: MANAGEMENT OF CYCLICAL LOADS AND ACOUSTIC EMISSION RECORDING

A. V. Patonin*, N. M. Shikhova

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

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

The paper presents a laboratory setup based on the Inova controlled servo-hydraulic press, which is used to simulate the trigger activation of fractures under the influence of weak cyclic stresses. The key element is a software and hardware complex based on the Arduino Mega-2560 microcontroller, which provides flexible control over the loading modes. The system allows for the implementation of cyclic axial loads with a specified amplitude under a comprehensive pressure of up to 140 MPa and a pore pressure of up to 70 MPa, which is created by independent high-pressure pumps. A special feature of the installation is the presence of adaptive control based on acoustic emission (AE) parameters: when the specified amplitude or frequency of AE events is exceeded, the system automatically reduces the loading rate, which prevents uncontrolled destruction of the sample and allows for the detection of critical transitions in the material structure.

A system of 16 piezoelectric sensors, evenly distributed around a cylindrical sample with a diameter of 30 and a height of 60 mm, is used to register microcracks. This configuration provides 3D localization of AE sources with an accuracy of ~ 2 mm and allows to determine, among other things, the mechanism of each event using the original AESAM+ISO technique.

To debug the methodology for forming a main fracture, a series of tests was conducted on various types of sandstones with different average grain sizes and degrees of cementation. The cyclic loads implemented in the experiment, with an amplitude of up to 70 MPa and a всестороннее pressure of up to 30 MPa, simulated natural trigger effects at depths of 1–3 km, such as tidal deformations of the Earth's crust, seasonal fluctuations in pore pressure, and background microseismic vibrations. At the same time, the quasi-static loading mode with a rate of 0.01–0.1 MPa/s allowed to separate the processes of damage accumulation from dynamic destruction, which is critical for studying the trigger effect. The experiments were carried out in the presence of a small cyclic effect both at the stage of the formation of the main rupture and at the stage of sliding of the banks of the formed rupture.

The maximum stress in the cycles did not exceed 40–50% of the ultimate strength of the studied sandstones under the specified all-round pressure, which allows us to consider the cyclic effect as weak trigger disturbances similar to tidal deformations in natural conditions. During the tests, continuous recording of the waveforms of acoustic emission (AE) signals was performed. At the post-processing stage, the AE events were detected and parameterized, which allowed the creation of catalogs and bulletins of acoustic events.

ПРОХОДКА И КРЕПЛЕНИЕ ВЫРАБОТОК В МАССИВАХ, ПОДВЕРЖЕННЫХ ДЕЙСТВИЮ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

П. Г. Пацкевич^{1,*}, А. В. Жабко², Е. В. Красюкова¹, С. А. Горинов²

¹Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия

²Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

*E-mail: patskevich@outlook.com

Наблюдаемое во всем мире истощение расположенных вблизи поверхности запасов полезных ископаемых с неизбежностью влечет расширение их добычи подземным способом. В подземной добыче напряжённое состояние горных пород существенно влияет на устойчивость выработок и конструктивных элементов систем разработки при выемке полезных ископаемых. В России значительная часть полезных ископаемых добывается в районах, подверженных действию тектонических сил. Это месторождения Горной Шории и Хакасии, Хибин, Дальнего Востока и ряда других регионов.

Неотъемлемой частью подземной разработки полезных ископаемых является проходка в горных породах выработок различного назначения и их поддержание в рабочем состоянии на период их эксплуатации. Практика проходческих работ показывает, что в прочных породах в условиях действия значительных горизонтальных напряжений даже при применении контурного взрывания и оптимальной форме сечения в ряде случаев происходят существенные законтурные разрушения пород, что негативно влияет на безопасность горных работ, их скорость и экономическую эффективность. Следовательно, разработка технологии проведения, включающая буровзрывные работы, и поддержания подземных выработок в условиях действия тектонических сил является важной и актуальной задачей для практики горнопроходческих работ. Для решения поставленной задачи необходимым условием является выявление основных факторов, влияющих на качество законтурного массива и дальнейшее его разрушение.

Теоретические исследования показали, что технология проходки выработки в тектонически напряженных массивах должна учитывать, что горизонтальные напряжения существенно превосходят вертикальное давление налегающих пород. Показано, что направление расширения врубовой полости при формировании сечения выработки оказывает значительное влияние на степень нарушения законтурного массива, поэтому при выполнении взрывных работ необходимо расширять врубовую полость таким образом, чтобы длинная сторона промежуточного сечения была направлена в сторону наибольших сжимающих напряжений. Верификация полученных результатов осуществлялась при проходке горно-капитальной выработки в тектонически напряженном массиве на руднике «Олений ручей». Одновременно выполнялись исследования по выбору параметров технологии крепления и поддержания горных выработок.

В результате выполненных исследований, включающих обследование законтурных пород вокруг выработки через смотровые скважины с помощью видеоэндоскопа Jprobe FX, определение упругих характеристик горных пород вблизи контура выработки при помощи ультразвуковых измерений и математического моделирования НДС массива в динамике проходки, установлен механизм формирования зон разрушения горных пород вокруг выработок при проходке в условиях высоконапряженных горных массивов. Определены параметры развития этих зон в зависимости от показателей качества массива, структурных характеристик и его напряженного-деформированного состояния. Выявлено, что крепь горных выработок активно влияет на напряженно-деформированное состояние приконтурного массива на расстоянии 0.5–1 горизонтального пролета выработки. При выполнении взрывных работ необходимо формировать сечение выработки таким образом, чтобы при расширении врубовой полости длинная сторона промежуточного сечения была направлена в сторону наибольших сжимающих напряжений. При креплении необходимо не допускать отставания анкерной крепи на расстояние более 2-х метров от забоя выработки.

Теоретические и практические рекомендации были переданы предприятию для проведения опытно-промышленных испытаний и дальнейшей корректировки параметров технологии проведения и поддержания горных выработок на руднике «Олений ручей».

DEVELOPMENT AND SUPPORT OF UNDERGROUND WORKINGS IN ROCK MASSES SUBJECTED TO TECTONIC STRESSES

P. G. Patskevich^{1,*}, A. V. Jabko², E. V. Krasnyukova¹, S. A. Gorinov²

¹*Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences (ICEMR RAS), Moscow, Russia*

²*Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia*

*E-mail: patskevich@outlook.com

The global depletion of near-surface mineral reserves inevitably leads to the expansion of underground mining operations. In underground mining, the stress-strain state of rocks significantly affects the stability of workings and development system elements during mineral extraction. In Russia, a substantial portion of minerals is extracted from areas influenced by tectonic forces, including deposits in Gornaya Shoria and Khakassia, the Khibiny Mountains, the Far East, and several other regions. Drivage of various-purpose workings in rock masses and their maintenance in operational condition throughout the exploitation period constitute an integral part of underground mineral development.

Drivage practice demonstrates that in competent rocks under high horizontal stresses, even with contour blasting and optimal cross-section shapes, significant overbreak occurs in some cases, adversely impacting mining safety, advance rates, and economic efficiency. Consequently, developing drivage technology—including drilling and blasting operations—and support methods for underground workings under tectonic stress conditions represents a critical and relevant challenge for mining practice. A prerequisite for addressing this task is identifying the primary factors influencing the quality of the overbreak mass and its subsequent deterioration.

Theoretical studies have shown that drivage technology in tectonically stressed masses must account for horizontal stresses substantially exceeding the vertical overburden pressure. It has been established that the direction of undercut cavity expansion during working cross-section formation significantly affects the degree of disturbance in the surrounding mass; therefore, during blasting, the undercut cavity should be expanded such that the long side of the intermediate cross-section aligns with the direction of maximum compressive stresses. Verification of the results was conducted during drivage of a main haulage roadway in a tectonically stressed mass at the Oleniy Ruchey Mine.

Concurrent studies addressed the selection of support technology parameters for workings maintenance.

The investigations, which included overbreak rock inspection around the working via observation boreholes using a Jprobe FX video endoscope, determination of elastic rock properties near the working contour through ultrasonic measurements, and mathematical modeling of the dynamic stress-strain state during drivage, established the mechanism of failure zone formation around workings during drivage in highly stressed rock masses. Parameters of these zones' development were determined as functions of mass quality indicators, structural characteristics, and stress-strain state.

It was found that working support actively influences the stress-strain state of the peripheral mass at distances of 0.5–1 times the horizontal span of the working.

During blasting operations, the working cross-section should be formed such that the long side of the intermediate cross-section during undercut cavity expansion is oriented toward the maximum compressive stresses. For support installation, anchorage must not lag more than 2 meters behind the face.

Theoretical and practical recommendations were provided to the enterprise for semi-industrial trials and subsequent adjustment of drivage and maintenance technology parameters at the Oleniy Ruchey Mine.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕГИСТРАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВОВ НА ПОВЕРХНОСТИ И В ВЫРАБОТКЕ

С. М. Петухова*, А. Ю. Федоров

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: sofiya.petukhova@gmail.com*

Разработка железорудных месторождений Курской магнитной аномалии (КМА) ведется комбинированным способом – открытым и закрытым (подземным). Регулярно проводимые массовые взрывы создают сейсмическое воздействие, которое распространяется как по поверхности, так и вглубь массива горных пород. Был выполнен сравнительный анализ параметров регистрации взрывов на разных уровнях массива. В основу работы положены данные натурных наблюдений, выполненных на территории шахтного поля Коробковского месторождения АО «Комбинат КМАруда». Регистрация осуществлялась синхронно в трех пунктах наблюдений: два пункта расположены на поверхности и оборудованы сейсмометрами и датчиками уровня подземных вод. Третий пункт создан в отработанной камере шахты на горизонте -70 м и позволяет вести регистрацию как сейсмических записей, так и расхода воды из шпура. Массовые взрывы производились в камерах, расположенных в пределах нижней и верхней железорудных подсвет, а также на разных горизонтах Лебединского карьера.

При проведении массового взрыва максимальные значения колебаний грунта зафиксированы на поверхности при минимальном приведенном расстоянии. С увеличением приведенного расстояния значения массовой скорости снижались. В подземном пункте максимальные значения амплитуд скоростей смещения грунта оказались ниже, что подтверждает затухание сейсмических волн при распространении вглубь массива.

Спектральный анализ выявил различия в частотном составе сигналов, обусловленные геологическими условиями в пунктах регистрации. В пункте, приуроченном к сланцам нижней железорудной подсветы, экстремумы спектров вертикальной компоненты и гидрогеологического отклика совпадают, что свидетельствует о пороупругой реакции водонасыщенного коллектора. В пункте, расположенном в области развития железистых кварцитов, выделяется несколько экстремумов, указывающих на более сложный механизм реакции системы «пласт-скважина». В подземном пункте экстремумы прослеживаются по горизонтальной компоненте, ориентированной на источник воздействия. Установлено, что реакция системы «пласт-скважина» опережает вступление сейсмической волны.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012200570-5).

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE INDUSTRIAL BLASTS RECORDED ON THE SURFACE AND IN THE MINE

S. M. Petukhova*, A. Y. Fedorov

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

**E-mail:sofiya.petukhova@gmail.com*

The development of iron ore deposits in the Kursk Magnetic Anomaly (KMA) is carried out using a combined method – open-pit and underground. Regularly conducted mass blasts generate seismic effects that propagate both across the surface and into the rock mass. A comparative analysis of blast recording parameters at different levels of the rock mass was performed. The study is based on field observation data obtained from the mine field of the Korobkovo deposit of JSC «Kombinat KMAruda». Recording was carried out synchronously at three observation points: two points located on the surface, equipped with seismometers and groundwater level sensors. The third point was established in a mined-out chamber of the mine at the -70 m horizon, enabling the recording of both seismic signals and water flow from a borehole. Mass blasts were conducted in chambers located within the lower and upper iron ore subformations, as well as at different horizons of the Lebedinsky quarry.

During a mass blast, maximum ground vibration values were recorded on the surface at the minimum scaled distance. As the scaled distance increased, the mass velocity values decreased. At the underground point, the maximum amplitudes of ground motion velocity were lower, confirming the attenuation of seismic waves as they propagate into the rock mass.

Spectral analysis revealed differences in the frequency composition of the signals, attributed to the geological conditions at the recording points. At the point associated with the shales of the lower iron ore subformation, the spectral extremes of the vertical component and the hydrogeological response coincide, indicating a poroelastic response of the water-saturated reservoir. At the point located in the area of ferruginous quartzite development, several extremes are distinguished, suggesting a more complex response mechanism of the «formation–well» system. At the underground point, extremes are observed in the horizontal component oriented toward the source of the impact. It was established that the response of the «aquiferwell» system precedes the arrival of the seismic wave.

**ВОЗДЕЙСТВИЕ УНЧ–КНЧ ИЗЛУЧЕНИЙ ОТ ЛЭП НА ОКОЛОЗЕМНУЮ СРЕДУ:
МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА**

В. А. Пилипенко^{1,*}, Н. В. Савельева¹, А. С. Карпов², В. В. Колобов², Джинг Ву³

¹*Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия*

²*Центр физико-технических проблем энергетики Севера, Кольский научный центр, Апатиты, Россия*

³*Университет Бейханг, Пекин, Китай*

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

Реальность воздействия излучения линий электропередачи (ЛЭП) на околоземное пространство подкрепляется численной моделью для расчёта электромагнитного отклика в верхней ионосфере от заземлённого излучателя конечной длины над высокоомной земной поверхностью. Теоретические оценки с использованием численной модели ультра-низкочастотного/крайне-низкочастотного (УНЧ/КНЧ) поля в реалистичной атмосфере и ионосфере, создаваемого линейным приземным током, хорошо согласовались с наблюдениями. Об эффективности горизонтальных мега-антенн для зондирования ионосферы свидетельствует успешная регистрация на спутниках DEMETER (орбита ~ 660 км), CSES-1 (~ 500 км), «Ионосфера-М» (~ 820 км) излучения передатчика ЗЕВС с несущей частотой 82 Гц. Представлена концепция нового типа активного эксперимента по регистрации УНЧ-КНЧ сигналов от наземных протяженных антенн как на сети наземных станций, так и на низкоорбитальных спутниках CSES-2 и Ионосфера-М. Такими излучающими мега-антеннами послужат временно выведенные в ремонт ЛЭП в Мурманской области. По скоординированной с пролётами спутников программе мощный генератор в ночные часы будет подавать в ЛЭП ток на частотах от долей Гц до сотни Гц. Ранее в Мурманской области уже проводились подобные эксперименты FENICS. Проведённые спутниковые и наземные наблюдения и накопленный опыт проведения экспериментов FENICS показывают перспективность нового типа активных экспериментов для генерации УНЧ/КНЧ сигналов для глобального магнитотеллурического зондирования, воздействия искусственными сигналами на околоземную плазму и стимуляции высыпания релятивистских электронов радиационного пояса. Планируемый эксперимент позволит дать физическое обоснование опасности нарастания электромагнитного «загрязнения» околоземной среды промышленными излучениями.

**IMPACT OF ULF-ELF EMISSIONS BY POWER TRANSMISSION LINES ON THE NEAR-EARTH SPACE:
MODELING AND EXPERIMENTAL VERIFICATION**

V. A. Pilipenko^{1,*}, N. V. Savelyeva¹, A. S. Karpov², V. V. Kolobov², Djing Wu³

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

²*Center for Physical and Technical Problems of Northern Energy, Kola Science Center, Apatity, Russia*

³*Beihang University, Beijing, China*

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

The feasibility of a trigger impact of the power line emission (PLE) on the near-Earth space is demonstrated by a numerical model for calculating the electromagnetic response in the ionosphere from a grounded current of finite length above a high-resistance Earth surface. Theoretical estimates using a numerical model of the ULF/ELF field in the atmosphere and ionosphere created by a linear near-ground current were in a good agreement with low-orbit satellite observations. The effectiveness of horizontal mega-antennas for ionospheric sounding was demonstrated by the successful recording of ZEVS transmitter radiation with a carrier frequency of 82 Hz on the DEMETER (~ 660 km), CSES-1 (~ 500 km), and Ionosfera-M (~ 820 km) satellites. A concept of a new type of active experiment for recording ULF-ELF-VLF signals from extended ground antennas, both on a network of ground stations and on low-orbit satellites, is presented. Transmission lines temporarily down for repairs in the Murmansk region will serve as the radiating mega-aerials. Under a schedule coordinated with satellite overflights, a powerful generator will supply current to the transmission line at night at frequencies

from fractions of a Hz to a hundred Hz. Similar FENICS experiments were previously conducted in the Murmansk region. Satellite and ground-based observations and the accumulated experience of the FENICS experiments demonstrated the potential of a new type of active experiment for influencing near-Earth plasma with artificial signals and stimulating the precipitation of relativistic electrons from the radiation belt. The planned satellite-ground experiment will quantify the physical basis for the problem of ever growing electromagnetic «pollution» of the outer space by man-made emissions.

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО РАЗМЕРУ СВЕЖИХ УДАРНЫХ КРАТЕРОВ НА МАРСЕ

Е. Д. Подобная*, О. П. Попова

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: epodobnaya@gmail.com*

Многолетняя съемка поверхности Марса орбитальными камерами позволила идентифицировать более 1400 недавних датированных мест падения метеороидов метрового масштаба. Более половины падающих тел разрушается в атмосфере и образуют кластеры кратеров. Анализ ударов метеороидов на Марсе дает возможность исследовать популяцию метеороидов общую для Земли и Марса.

Ранее было предложено разделить недавно образованные марсианские кластеры (всего 830 кластеров) на три группы: кластеры с доминирующим главным кратером, дополненным несколькими гораздо более мелкими кратерами (группа 1), густонаселённые кластеры (группа 2) и малонаселённые кластеры с несколькими сопоставимыми наибольшими кратерами (группа 3).

Для рассматриваемых кластеров были построены распределения кратеров по размерам и аппроксимированы двумя законами (степенным и усеченным степенным). При аппроксимации обычным степенным законом средний наклон показателя степени оценивается как 0.8, 2 и 1.5 для трех рассматриваемых групп. При аппроксимации усеченным степенным законом показатель степени находится в более узком диапазоне значений (0.8–1.1). Построенные распределения показателей степени для обоих степенных законов показывают, что группа 1 (доминирующий главный кратер) выделяется наиболее четко.

Полученные оценки показателя степени для распределения кратеров в кластере не противоречат распределению фрагментов метеоритов на Земле и распределению фрагментов в ударных экспериментах. Оценки показателя степени, полученные по методу максимального правдоподобия, для обоих степенных законов в среднем хорошо коррелируют друг с другом и с нашими оценками.

Проверка статистического различия выделенных в классификации групп проводилась с применением различных методов. Мы предполагаем, что выделенные группы могут соответствовать различным типам ударников и (или) различным типам разрушения метеороида в атмосфере.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012200624-5).

ANALYSIS OF THE SIZE-FREQUENCY DISTRIBUTION OF FRESH IMPACT CRATERS ON MARS

E. D. Podobnaya*, O. P. Popova

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

** E-mail: epodobnaya@gmail.com*

Multi-year imaging of the Martian surface with orbital cameras had identified over 1,400 freshly formed dated meteoroid impact sites of meter-scale meteoroids. Over half of the impactors disintegrate in the atmosphere, forming crater clusters. Analysis of recent Martian impact sites provides an opportunity to study the meteoroid population, which is common for both Earth and Mars.

Previously, three types of fresh Martian clusters (830 impact sites) were identified. The first one includes clusters with one major crater supplemented by some much smaller ones; densely populated clusters correspond to the second type and the final group relates to sparsely populated clusters, which have 2 or more comparable largest craters.

Crater size-frequency distributions were constructed for the considered clusters, which were approximated by two types of power law (usual and truncated). The average slope of the usual power law exponent was estimated to be 0.8, 2, and 1.5 for the three groups under consideration. Truncated power law approximation resulted in a narrower range of values (0.8–1.1). The constructed distributions of the exponents for both power laws showed that group 1 (the dominant main crater) stood out most clearly.

The obtained estimates of the exponent for the crater distribution within the clusters are consistent with the distribution of meteorite fragments on the Earth and the fragment distribution in impact experiments. The exponent estimates obtained by the maximum likelihood method for both power laws correlate well on average with each other and with our estimates.

Statistical differences between the identified type were verified using various methods. We suggest that the identified groups may correspond to different types of impactors and/or different scenarios of meteoroid fragmentation in the atmosphere.

УНИКАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ УСТАНОВКА «СРЕДНЕШИРОТНЫЙ КОМПЛЕКС ГЕОФИЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ «МИХНЕВО»»: ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Ю. В. Поклад*, А. Н. Беседина, Б. Г. Гаврилов, А. Г. Гоев, Э. М. Горбунова, Ю. С. Рыбнов,
С. П. Соловьев, И.А. Ряховский

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

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

В 2021 г. на базе геофизической обсерватории «Михнево» (координаты 54.962 СШ и 37.763 ВД, площадь территории 1 кв.км) была организована новая уникальная научная установка «Среднеширотный комплекс геофизических наблюдений «Михнево» (УНУ СКГН «Михнево»). В ее состав вошли системы инструментальной регистрации параметров различных геофизических полей и характеристик их взаимодействия. Синхронная регистрация параметров физических полей и применение различных методов наблюдений позволяет исследовать механизмы взаимодействия квазистатических и динамических процессов в разных геосферах: литосфере, атмосфере, ионосфере.

В состав УНУ СКГН «Михнево» входят следующие аппаратурные комплексы, позволяющие проводить широкий спектр синхронных исследований:

- сейсмические наблюдения с использованием малоапертурной группы с центральным прибором, расположенным в штольне (на глубине 20 м);
- гидрогеологические исследования, в двух наблюдательных скважинах вскрывающих разновозрастные водоносные горизонты;
- атмосферные исследования с использованием автоматической цифровой метеостанции, микробарометра, измерителя напряженности электрического поля, регистратора грозовой активности и регистратора мелкодисперсных частиц;
- ионосферные наблюдения проводятся с помощью многочастотных и мультисистемных ГНСС приемников, камеры полного неба и регистраторов магнитного поля. ГНСС приемники позволяют получать полное электронное содержание ионосферы. Комплекс по измерению магнитных полей - данные по: вектору полного магнитного поля Земли, амплитуды и фазы магнитного поля в диапазоне от 0 Гц до 60 кГц.

За прошедшие 5 лет, прошедшие с момента создания УНУ СКГН «Михнево», по результатам исследований были получен ряд значимых научных результатов, опубликованных в ведущих научных изданиях. Из них более 15 публикаций в ведущих научных журналах первого квартала. В ближайшее время планируется увеличение количества приемников в малоапертурной сейсмической группе для улучшения соотношения сигнал/шум и расширение радиофизических исследований на КВ/УКВ диапазон.

Данные были получены с использованием уникальной научной установки «Среднеширотный комплекс геофизических наблюдений «Михнево» (ИДГ РАН).

THE UNIQUE SCIENTIFIC INSTALLATION "MIKHNEVO MID-LATITUDE GEOPHYSICAL OBSERVATION COMPLEX": MAIN RESULTS AND PROSPECTS.

***Yu. V. Poklad , A. N. Besedina, B. G. Gavrilov, A. G. Goev, E. M. Gorbunova, Yu. S. Rybnov, S. P. Soloviev, I. A. Ryakhovsky**

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

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

In 2021, a new unique scientific facility, the "Mikhnevo Mid-Latitude Geophysical Observatory" (MLGO) was established at the Mikhnevo Geophysical Observatory (coordinates 54.962 N, 37.763 E, covering an area of 1 square kilometer). It includes instrumental recording systems for the parameters of various geophysical fields and the characteristics of their interactions. Synchronous recording of physical field parameters and the use of various observation methods allows for the study of the interaction mechanisms of quasi-static and dynamic processes in different geospheres: the lithosphere, atmosphere, and ionosphere.

The MLGO includes the following instrumental systems, enabling a wide range of synchronous studies:

- seismic observations using a small-aperture array with a central instrument located in a tunnel (at a depth of 20 m);
- hydrogeological studies in two observation wells tapping aquifers of different ages;
- atmospheric studies using an automatic digital weather station, a microbarometer, an electric field strength meter, a lightning activity recorder, and a fine particle recorder;
- ionospheric observations are conducted using multi-frequency and multi-system GNSS receivers, a full-sky camera, and magnetic field recorders. GNSS receivers provide the full electron content of the ionosphere. A magnetic field measurement system provides data on the Earth's total magnetic field vector, magnetic field amplitude, and phase in the range from 0 Hz to 60 kHz.

Over the past five years since the establishment of the Mikhnevo Scientific Research Institute, a number of significant scientific findings have been published in leading scientific journals. Of these, more than 15 publications have been published in leading first-quartile scientific journals. In the near future, it is planned to increase the number of receivers in the small-aperture seismic array to improve the signal-to-noise ratio and expand radiophysical research in the HF/VHF range.

КЛАССИФИКАЦИЯ СПУТНИКОВЫХ БОЛИДОВ

О. П. Попова*, Д. О. Глазачев

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

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

Популяция и физические характеристики околоземных объектов (NEO) размером в метры – десятки метров известны плохо. Тела таких размеров относятся к нижней границе обнаружения программами телескопического отслеживания NEO и не так часто попадают в атмосферу Земли как тела меньшего размера. Для таких тел имеются единичные оценки плотности вещества, для них плохо изучена внутренняя структура, известно только небольшое количество орбит. Наблюдения болидов при входе таких объектов в атмосферу дают возможность получить представление об их внутренней структуре и определить орбиту.

Недавно опубликованные данные кривых блеска болидов, зарегистрированных спутниковой системой USG (SN болиды), представляют собой уникальный материал, позволяющий получить представление о свойствах метровых и дециметровых тел. Кроме кривых блеска (для 818 болидов), имеется информация об излученной энергии, о примерных координатах события, оценка кинетической энергии болида. Примерно в половине случаев известна высота максимальной яркости болида, и для трети событий имеется оценка скорости входа, позволяющая также оценить угол и азимут входа.

Для классификации болидов было предложено несколько критериев, опирающихся на вариации интенсивности излучения и длительности вспышек, позволивших разделить кривые блеска на три основных типа: имеющие один максимум, растянутые кривые блеска и кривые блеска, соответствующие дискретному типу фрагментации. Классификация была применена к событиям, для которых известна скорость входа. На данный момент, кривые блеска с одним основным разрушением включают 87 кривых блеска (30%), дискретная фрагментация объединяет 128 кривых блеска (44%), а оставшиеся 77 кривых представляют собой растянутую фрагментацию (26%).

Кривые блеска дают возможность приблизительно оценить прочность метеороидов в момент наибольшей яркости для SN болидов. Наименьший разброс в прочности наблюдается у SN болидов, отнесенных к категории с одним главным максимумом, подавляющее большинство этих метеороидов имеет прочность в диапазоне 0.5–10 МПа. Наибольший разброс в прочностях демонстрируют болиды, отнесенные к категории дискретной фрагментации, их прочность варьируется в широких пределах, но и для этой категории более 80% болидов имеют оценку прочности в диапазоне 0.5–15 МПа.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012200624-5).

CLASSIFICATION OF SATELLITE BOLIDES

O. P. Popova*, D. O. Glazachev

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

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

The population and physical characteristics of near-Earth objects (NEOs) ranging in size from meters to tens of meters are poorly understood. Objects of this size are at the lower detection limit of NEO telescopic monitoring programs and do not enter Earth's atmosphere as frequently as smaller objects. For such objects, there are only isolated estimates of material density; their internal structure is poorly understood, and only a small number of orbits are known. Observations of fireballs when such objects enter the atmosphere provide an opportunity to gain insight into their internal structure and determine their orbit.

Recently published data on the light curves of fireballs recorded by the USG satellite system (SN Fireballs) provide unique insight into the properties of meter- and decameter-sized bodies. In addition to the light curves (for 818 fireballs), information on the emitted energy, approximate event coordinates, and an estimate of the fireball's kinetic energy are available. In approximately half of the cases, the altitude of maximum fireball brightness is known, and for a third of the events, an estimate of the entry velocity is available, allowing one to also estimate the angle and azimuth of entry.

Several criteria have been proposed for classifying fireballs, based on variations in emission intensity and outburst duration. These criteria allow light curves to be divided into three main types: those with a single maximum, extended light curves, and light curves corresponding to discrete fragmentation. The classification was applied to events for which the entry velocity is known. Currently, light curves with a single primary fragmentation include 87 light curves (30%), discrete fragmentation comprises 128 light curves (44%), and the remaining 77 curves represent extended fragmentation (26%).

Light curves provide a rough estimate of the strength of meteoroids at their brightest moments for SN bolides. The smallest variation in strength is observed for SN bolides classified as having a single primary maximum; the vast majority of these meteoroids have strengths in the range of 0.5–10 MPa. The greatest variation in strength is demonstrated by bolides classified as having discrete fragmentation; their strength varies widely, but even in this category, more than 80% of bolides have strength estimates in the range of 0.5–15 MPa.

ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЦИНТИЛЛЯЦИЙ РАДИОВОЛН В СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНОЙ ИОНОСФЕРЕ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ НА СПУТНИКЕ DYNAMIC EXPLORER 2

М. В. Прудникова, Е. С. Гончаров*

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: eggoncharov@yandex.ru*

На сегодняшний день спутниковая связь является одним из ключевых факторов функционирования современной цифровой инфраструктуры. Амплитудные и фазовые сцинтилляции радиосигналов, возникающие при распространении через случайно-неоднородную ионосферную плазму, оказывают существенное влияние на качество функционирования спутниковых систем связи, глобальных навигационных спутниковых систем и методов микроволнового дистанционного зондирования Земли.

Причиной сцинтилляций радиоволн ультравысоких (УВЧ) и сверхвысоких (СВЧ) частот являются турбулентные структуры электронной плотности ионосферы, размеры которых варьируются от метров до сотен километров. Такие неоднородности действуют как случайная дифракционная решётка: проходя через них, электромагнитная волна интерферирует сама с собой. В результате на приёмнике могут наблюдаться замирания сигнала, быстрые фазовые скачки и временные искажения структуры волны.

В настоящей работе рассматриваются критически важные аспекты трёхмерного численного моделирования ионосферного распространения УВЧ и СВЧ радиоволн в случайно-неоднородной ионосфере на основе метода множественных фазовых экранов. Данный метод позволяет учитывать пространственную структуру ионосферной турбулентности, воспроизводя статистические характеристики амплитудных и фазовых флуктуаций.

На основе серии трёхмерных численных расчётов ионосферного распространения радиоволн получены характеристики амплитудных и фазовых сцинтилляций для параметров турбулентной ионосферной плазмы, соответствующих экспериментальным данным спутника Dynamic Explorer 2 в период высокой солнечной активности 1981–1983 гг.

Полученные результаты подтверждают применимость метода множественных фазовых экранов для моделирования сцинтилляционных эффектов в ионосфере и могут быть использованы при разработке алгоритмов повышения помехоустойчивости спутниковых систем связи и навигации, а также при интерпретации данных микроволнового зондирования.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012200655-9).

THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL MODELING OF RADIO WAVE SCINTILLATIONS IN A RANDOMLY INHOMOGENEOUS IONOSPHERE BASED ON ELECTRON DENSITY MEASUREMENTS ON THE DYNAMIC EXPLORER 2 SATELLITE

M. V. Prudnikova, E. S. Goncharov*

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

** E-mail: eggoncharov@yandex.ru*

Satellite communications currently represent one of the key components of modern digital infrastructure. Amplitude and phase scintillations of radio signals arising during propagation through a randomly inhomogeneous ionospheric plasma significantly affect the performance of satellite communication systems, global navigation satellite systems (GNSS), and microwave remote sensing techniques.

The origin of scintillations of ultra-high frequency (UHF) and super-high frequency (SHF) radio waves lies in turbulent structures of ionospheric electron density, whose spatial scales range from meters to hundreds of kilometers. These irregularities represent a random diffraction grating. Propagating through these irregularities an electromagnetic wave undergoes self-interference. As a result, signal fading, rapid phase fluctuations, and temporal distortions of the wave structure may be observed at the receiver.

Our study addresses key aspects of three-dimensional numerical modeling of ionospheric propagation of UHF and SHF radio waves in a randomly inhomogeneous ionosphere using the multiple phase screen method. This approach enables accounting for the spatial structure of ionospheric turbulence and reproducing the statistical characteristics of amplitude and phase fluctuations.

Based on a series of three-dimensional numerical simulations of transionospheric radio wave propagation, amplitude and phase scintillation characteristics were obtained for turbulent ionospheric plasma parameters corresponding to experimental measurements from the Dynamic Explorer 2 satellite during the period of high solar activity from 1981 to 1983. T

The obtained results confirm the applicability of the multiple phase screen method for modeling ionospheric scintillation effects and can be used in the development of robust signal processing algorithms for satellite communication and navigation systems, as well as in the interpretation of microwave remote sensing data.

СЕЙСМИЧЕСКИЙ ОТКЛИК НА «КАННИБАЛЬСКУЮ» ГЕОМАГНИТНУЮ БУРЮ В ЯНВАРЕ 2026 г. И ВЫЗВАННЫЕ ИМ ГЛУБОКОФОКУСНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

С. А. Пулинец*, Д. Узунов, Г. Я. Хачикян

Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: pulse@cosmos.ru*

В этом исследовании изучаются каскадные геопространственные и сейсмические эффекты выброса корональной массы, называемого «каннибальским», вызванного мощной солнечной вспышкой класса X1.9 18 января 2026 г. Образовавшаяся в результате слияния ударная волна достигла Земли 19 января, инициировав сильную геомагнитную бурю класса G4. Эта буря характеризовалась двойным началом: первое достигло значения SYM/H -231 нТл 19 января, за которым последовал вторичный, более сильный пик -257 нТл 20 января. Одновременно с этим, в 19:15 UTC 19 января, разразилась сильная радиационная буря уровня S4, ставшая одним из самых интенсивных событий в истории наблюдений GOES.

Вследствие этой экстремальной активности космической погоды произошло заметное изменение глобальной сейсмичности. В период с 20 января по конец февраля 2026 г. было зарегистрировано 26 событий с магнитудой > 5.9. Примечательно, что около 38% (10 событий) произошли на глубинах очага, превышающих 100 км, что не имело места в 2024 и 2025 гг. Мы предполагаем, что эти глубоко залегающие события, в основном вдоль Тихоокеанского огненного кольца, представляют собой первоначальный геопространственный отклик на интенсивное электромагнитное воздействие.

Мы предполагаем задержку в 1–3 месяца в переходе от глубокофокусных к неглубоким землетрясениям. Эта задержка, вероятно, обусловлена миграцией газа, вызванной солнечной активностью, и восходящим движением геофлюидов. Этот механизм предполагает, что пик неглубокой сейсмической активности в земной коре, особенно в Азиатском регионе, придется на период с марта по апрель 2026 г.

«Каннибальская» буря 2026 г. служит редким примером крупномасштабного события, в котором индуцированный Солнцем триггер и последующая сейсмическая «волна» миграции из глубины на поверхность могут наблюдаться практически в режиме реального времени.

SEISMIC RESPONSE TO THE JANUARY 2026 «CANNIBAL» STORM AND RESULTING DEEP-FOCUS EVENTS

S. A. Pulinets*, D. Ouzounov, G. Ya. Khachikyan

Space Research Institute of Russian academy of sciences, Moscow, Russia

**E-mail: pulse@cosmos.ru*

This study investigates the cascading geospatial and seismic effects of the «Cannibal» Coronal Mass Ejection (CME), triggered by a powerful X1.9-class solar flare on January 18, 2026. The resulting merged shock wave hit Earth on January 19, initiating a severe G4-class geomagnetic storm. This storm displayed a distinctive double onset: the first reached a SYM/H of -231 nT on January 19, followed by a secondary, stronger peak of -257 nT on January 20. Simultaneously, a severe S4-level radiation storm peaked at 19:15 UTC on January 19, marking one of the most intense events in the GOES record.

Following this extreme space weather activity, a notable change in global seismicity occurred. Between January 20 and late February 2026, 26 events with $M > 5.9$ were recorded. Notably, about 38% (10 events) occurred at focal depths exceeding 100 km, a pattern absent in 2024 and 2025. We suggest that these deep-seated events, mainly along the Pacific Ring of Fire, represent an initial geospatial response to intense electromagnetic forcing.

We propose a 1- to 3-month delay in the transition from deep-focus to shallow earthquakes. This delay likely results from solar-induced gas migration and the upward movement of geofluids. This mechanism

suggests that the peak of shallow crustal seismicity, especially in the Asian region, will occur between March and April 2026.

The 2026 «Cannibal» storm serves as a rare, high-magnitude case study in which the solar trigger and the subsequent seismic «wave» of deep-to-shallow migration can be observed in near real-time.

ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ ПОРИСТЫХ ГРУНТОВ НА ПРОХОЖДЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН РАЗНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Е. А. Радюк*, А. А. Крылов

Институт океанологии имени П. П. Шишова Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: elena.radiuk@yandex.ru*

Оценка влияния грунтовой слоистой толщи верхней части геологического разреза на сейсмические воздействия является обязательной составляющей работ по оценке сейсмической опасности объектов критической инфраструктуры. При проведении таких исследований для сооружений в акваториях морей следует рассматривать пористую водонасыщенную структуру морских грунтов.

В настоящей работе с помощью численного моделирования была исследована зависимость сейсмического отклика водонасыщенных грунтовых слоев от значений влажности грунта и уровня входных воздействий (для SH волн). Для моделирования были созданы 6 синтетических грунтовых разрезов, по 3 для связных (глины) и несвязных (песок) грунтов, в которых приповерхностный грунт подстилался полупространством условно скального грунта. Для каждого типа грунта задавалось по 3 значения влажности 25, 50 и 75%. Глубина залегания грунта во всех профилях равно 10 м. Это было сделано с целью исключения влияния данного параметра на конечный результат.

Для каждого профиля грунта расчеты проводились с использованием трех наборов искусственных входных акселерограмм с различным пиковым ускорением грунта при землетрясении. Каждый набор состоит из пяти сигналов для уменьшения стохастического разброса результатов моделирования путем усреднения полученных спектров отклика. Три набора основных параметров моделируемого землетрясения следующие: $M = 4.5$, $R = 20$ км; $M = 6.0$, $R = 10$ км; $M = 7.0$, $R = 10$ км.

Численное моделирование осуществлялось с помощью программы MatNERApor, являющейся модифицированной версией известного алгоритма нелинейного анализа сейсмического отклика NERA. В основе алгоритма лежит модель зависимости напряжение-деформация Айвена-Мроза (нелинейная гистерезисная модель).

В результате расчетов выявлены следующие закономерности:

- насыщение амплитуд SH волн (с увеличением уровня входных воздействий) в верхней части грунтового разреза происходит быстрее в случае грунтов с более высокой влажностью;
- насыщение амплитуд SH волн у глин наступает тем быстрее, чем выше импеданс грунта. У связных грунтов импеданс падает с увеличением влажности;
- у песка импеданс возрастает с увеличением влажности, но насыщение амплитуд SH волн всё равно происходит тем быстрее, чем больше влажность;
- эффект насыщения в большей степени зависит от скоростей сейсмических волн в грунтах, чем от плотности или импеданса грунтов.
- для глин резонансная частота спектра смещается в сторону больших периодов с ростом влажности. У песка наблюдается тот же эффект, но он менее выражен.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 23-17-00125-П).

THE EFFECT OF MOISTURE IN POROUS SOILS ON THE PASSAGE OF HORIZONTAL SEISMIC WAVES OF VARYING INTENSITY

E. A. Radiuk*, A. A. Krylov

Shirshov Institute of Oceanology of Russian academy of sciences, Moscow, Russia

**E-mail: elena.radiuk@yandex.ru*

Assessment of the influence of the soil stratified stratum of the upper part of the geological section on seismic impacts is an obligatory component of work to assess the seismic hazard of critical infrastructure facilities. When conducting such studies for structures in the waters of the seas, the porous water-saturated structure of marine soils should be considered.

In this work, the dependence of the seismic response of water-saturated soil layers on the values of soil moisture and the level of input impacts (for SH waves) was investigated using numerical modeling. For modeling, 6 synthetic soil sections were created, 3 each for cohesive (clay) and non-cohesive (sand) soils, in which the subsurface soil was underlain by a half-space of conditionally rocky soil. For each type of soil, 3 moisture values of 25, 50 and 75% were set. The depth of the soil in all profiles = 10 m. This was done in order to exclude the influence of this parameter on the final result. For each soil profile, calculations were performed using three sets of artificial input accelerograms with different peak acceleration of the soil during an earthquake.

Each set consists of five signals to reduce the stochastic spread of the simulation results by averaging the obtained response spectra. The three sets of basic parameters of the simulated earthquake are as follows: $M = 4.5$, $R = 20$ km; $M = 6.0$, $R = 10$ km; $M = 7.0$, $R = 10$ km.

Numerical modeling was carried out using the MatNERApor program, which is a modified version of the well-known nonlinear seismic response analysis algorithm NERA. The algorithm is based on the Ivan-Mroz stress-strain dependence model (nonlinear hysteresis model).

As a result of calculations, the following patterns were revealed:

- saturation of the amplitudes of SH waves (with an increase in the level of input signal) in the upper part of the soil section occurs faster in the case of soils with higher moisture;
- saturation of the amplitudes of SH waves in clays occurs faster, the higher the impedance of the soil. For cohesive soils, the impedance decreases with increasing moisture;
- in sand, the impedance increases with increasing moisture, but saturation of the amplitudes of SH waves still occurs faster, the higher the moisture;
- the saturation effect depends more on the velocity of seismic waves in the soil than on the density or impedance of the soil;
- for clays, the resonant frequency of the spectrum shifts towards longer periods with increasing moisture. Sand has the same effect, but it is less pronounced.

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРАКТИЧЕСКОГО ВЫЯВЛЕНИЯ ПРИБЛИЖЕНИЯ СОСТОЯНИЯ КУСКОВАТО-БЛОЧНОЙ СРЕДЫ К ТОЧКЕ БИФУРКАЦИИ ИЗ ДАННЫХ ОБ ЭВОЛЮЦИИ СЕЙСМОГЕННОЙ СТРУКТУРЫ И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Ю. Л. Ребецкий*

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

**E-mail: reb@ifz.ru*

При решении обратной задачи тектонофизики по реконструкции корового напряженного состояния из разрывных смещений (зеркала скольжения и механизмы очагов землетрясений) рассмотрены различные модификации целевых функций, базирующихся на гипотезе Уэллеса (близость смещений и касательных напряжений на разрывах). Показано, что все применяемые целевые функции имеют структуру, аналогичную диссипативной функции в классической теории пластичности с потенциалом Губера–Мизеса. Главным недостатком таких функций является существенная ошибка в определении ориентации главных напряжений при отсутствии или малом числе сколов второй сопряженной системы трещин. В этом случае оптимальной будет ориентация главных напряжений, при которой сколовые трещины близки к площадкам действия максимальных касательных напряжений.

Для модели геосреды в виде идеальной упругой с трением на разрывах кусочно-блочной системы (М. А. Садовский) предложено новое выражение для целевой функции, состоящее из разности удельной энергии упругой разгрузки и удельной работы, затрачиваемой на преодоление напряжения трения на разрывах. Максимальные значения такой целевой функции определяют положения наблюдаемых сколовых трещин с углами к максимальным главным напряжениям, отвечающими теории Кулона–Мора.

Для нового вида целевой функции условие Уэллеса, определяющее максимум энергии упругой разгрузки (теорема Гамильтона для консервативных механических систем), как и условие минимальности работы против сил трения (принцип Пригожина для диссипативных систем), в их экстремальном виде не выполняются. Требование максимума новой целевой функции определяет максимум мощности сейсмического излучения и характеризует термодинамическую оптимальность вовлечения системы разноориентированных разрывов в процесс сеймотектонического течения геосреды. Кусковато-блочная геосреда имеет разномасштабные иерархические уровни, что обеспечивает системе необходимый набор степеней свободы для перестройки внутренней структуры. Это позволяет системе эффективно адаптироваться к внешнему нагружению, формируя режим сеймотектонического течения. Данный вывод имеет фундаментальное значение для сейсмологии, т.к. переводит эмпирические наблюдения отклонения суммарного сейсмического излучения от средних значений, используемое для прогноза землетрясений, в разряд физически обоснованных критериев. Эти отклонения отражают не случайные флуктуации, а процесс самоорганизации геосреды как термодинамической системы.

Утверждение о том, что амплитуды отрицательных отклонений сейсмической диссипации от средних значений прямо определяют величины накопления в геосреде энергии упругих деформаций, является как минимум неточным, поскольку баланс энергии связан не только сейсмическим излучением, но и с диссипацией в тепло на разрывах. Практические расчеты показывают, что в большом числе случаев энергия, затрачиваемая на преодоление сил трения, может как кратно превосходить энергию сейсмического излучения из очага землетрясения, так быть кратно меньшей. Падение сейсмической активности может свидетельствовать не о накоплении напряжений, а о переходе системы к иному, несейсмическому режиму диссипации в рамках её динамической адаптации, например, к крипу, медленным, тихим и низкочастотным землетрясениям с преимущественным производством энтропии геосреды.

В ходе прогрессирующего внешнего нагружения может происходить постепенный рост производства энтропии геосреды и/или сейсмической диссипации, которые следует анализировать с позиции

нелинейной неравновесной термодинамики (принцип Циглера). Для геосреды, аппроксимируемой кусковато-блочной идеально упругой системой с трением на разрывах, могут быть сформулированы две теоремы:

1. Стационарная стадия сейсмотектонического процесса отвечает максимуму сейсмической диссипации при оптимизации стремления к выполнению принципов Гамильтона и Пригожина.

2. Неустойчивость сейсмотектонического процесса, рассматриваемая в рамках нелинейной неравновесной термодинамики и принципа Циглера, может быть выявлена из эволюционного анализа поведения системы и должна связываться с постепенным повышением производства энтропии на активных сейсмогенных разломах.

Использование выявленных закономерностей позволяет наметить пути развития теории долговременного прогноза землетрясений.

Работа выполнена по Госзаданию ИФЗ РАН.

THE POSSIBILITY OF PRACTICAL IDENTIFICATION OF THE APPROXIMATION OF THE STATE OF A LUMPY-BLOCK MEDIUM TO THE BIFURCATION POINT FROM DATA ON THE EVOLUTION OF THE SEISMOGENIC STRUCTURE AND STRESS STATE

Yu. L. Rebetskii*

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: reb@ifz.ru*

When solving the inverse tectonophysics problem of reconstructing the crustal stress state from discontinuous displacements, various modifications of target functions based on the Wallace hypothesis are considered. It is shown that all the applied objective functions have a structure similar to the dissipative function in the classical theory of plasticity with the Huber-Mises potential. The main disadvantage of such functions is a significant error in determining the orientation of the principal stresses in the absence or small number of chips of the second coupled crack system. In this case, the orientation of the principal stresses will be optimal, at which the chipped cracks are close to the sites of maximum shear stresses.

For a model of the geo-environment in the form of an ideal elastic piecewise-block system (M.A.Sadovsky), a new expression for the objective function is proposed, consisting of the difference between the specific energy of elastic unloading and the specific work expended to overcome the frictional stress at the ruptures. The maximum values of such an objective function determine the positions of the observed chipped cracks with angles to the maximum principal stresses corresponding to the Coulomb–Mohr theory.

For the new type of objective function, the Wallace condition, which determines the maximum energy of elastic unloading (Hamilton's theorem for conservative mechanical systems), as well as the condition for minimal work against friction forces (Prigogine's principle for dissipative systems), are not fulfilled in their extreme form.

Practical calculations show that in a large number of cases, the energy spent on overcoming friction forces can be either many times higher than the energy of seismic radiation from the earthquake source, or be many times lower. A drop in seismic activity may indicate not an accumulation of stresses, but a transition of the system to a different, non-seismic mode of dissipation as part of its dynamic adaptation, for example, to creep, slow, quiet and low-frequency earthquakes with a predominant production of entropy of the geomedium.

During progressive external loading, there may be a gradual increase in the production of entropy of the geomedia and/or seismic dissipation, which should be analyzed from the perspective of nonlinear nonequilibrium thermodynamics (Ziegler's principle). Two theorems can be formulated for a geo-environment approximated by a lumpy-block ideally elastic system with fracture friction:

1. The stationary stage of the seismotectonic process corresponds to the maximum of seismic dissipation while optimizing the desire to fulfill the principles of Hamilton and Prigozhin.

2. The instability of the seismotectonic process, considered in the framework of nonlinear nonequilibrium

thermodynamics and the Ziegler principle, can be identified from an evolutionary analysis of the behavior of the system and should be associated with a gradual increase in entropy production on active seismogenic faults.

The use of the revealed patterns allows us to outline the ways of developing the theory of long-term earthquake forecasting.

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАЙОНИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ УЧАСТКОВ РАЗЛОМОВ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ ПО КУЛОНОВЫМ НАПРЯЖЕНИЯМ

Ю. Л. Ребецкий^{1,*}, А. М. Муралиев²

¹*Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия*

²*Институт Сейсмологии Национальной академии наук Кыргызской Республики, Бишкек, Кыргызстан*

*E-mail: reb@ifz.ru

По данным каталога механизма очагов землетрясения сети сейсмических станций KGnet Республики Кыргызстан выполнена реконструкция напряжений для коры Центрального Тянь-Шаня катакластическим методом Ю. Л. Ребецкого.

Получены данные о напряжениях для четырех глубинных диапазонов. На основе этих данных рассчитаны нормальные и касательные напряжения на разломах, представленных в «Базе данных активных разломов Евразии и прилегающих акваторий (AFEAD)» ГИН РАН. Направления углов погружения на этих разломах специально оценивались в автоматизированном режиме из данных о ближайших механизмах очагов землетрясений. Это позволило рассчитать величины кулоновых напряжений на участках разломов. В результате было установлено, что в исследуемом регионе в глубинном диапазоне 0–10 км можно выделить 4 зоны разломов, для которых критический уровень кулоновых напряжений более 60% от предела хрупкой прочности имеет протяженность около 100 км, что соответствует возможности возникновения землетрясений с магнитудой более 7.5.

Результаты расчетов позволили также выявить вариации напряжений во временном диапазоне реконструкции напряжений. В работе будет представлена концепция оценки уровня опасности участков разломов, опирающаяся на представлении о длительной прочности. В рамках этой концепции важным является не только напряженное состояние сегодняшнего дня, но и уровень кулоновых напряжений в предыдущие годы. В рамках такой концепции необходимо учесть не только диапазон ошибок определения параметров напряженного состояния, но и оценить разное влияние этих ошибок в прошлом и настоящем. В докладе будет представлена первая из таких попыток оценок длительной прочности с учетом разной роли вероятности ошибки в прошлом и настоящем.

THE FIRST RESULTS OF THE ZONING OF DANGEROUS SECTIONS OF THE CENTRAL TIEN SHAN FAULTS BY COULOMB STRESSES

Yu. L. Rebetskii^{1,*}, A. M. Muraliev²

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

²*Seismology Institute, Bishkek, Kyrgyzstan*

*E-mail: reb@ifz.ru

According to the catalog of earthquake source mechanisms of the KGnet network of seismic stations in the Republic of Kyrgyzstan, stress reconstruction for the crust of the Central Tien Shan was performed using the cataclastic method of Yu.L.Rebetsky.

Stress data has been obtained for four depth ranges. Based on these data, the normal and shear stresses on the faults presented in the «Database of Active Faults of Eurasia and Adjacent Water Areas (AFEAD)» of the GIN RAS were calculated. The directions of the dip angles on these faults were specially estimated in an automated mode from data on the nearest mechanisms of earthquake foci. This made it possible to calculate the Coulomb stresses in the fault sections. As a result, it was found that in the studied region, in the depth range of 0–10 km, 4 fault zones can be distinguished, for which the critical Coulomb stress level of more than 60% of the brittle strength limit has a length of about 100 km, which corresponds to the possibility of earthquakes with a magnitude greater than 7.5.

The calculation results also allowed us to identify stress variations in the time range of stress reconstruction. The paper will present a concept for assessing the level of danger of fault sections based on the concept of

long-term durability. Within the framework of this concept, not only the tense state of today is important, but also the level of Coulomb stresses in previous years. In the framework of such a concept, it is necessary to take into account not only the range of errors in determining the parameters of the stress state, but also to assess the different effects of these errors in the past and in the present. The report will present the first of such attempts to assess long-term durability, taking into account the different role of the probability of error in the past and in the present.

ГЛУБИННЫЕ ФЛЮИДНЫЕ ПОТОКИ ПО СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИМ И ГЕОХИМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

М. В. Родкин*

Институт нефти и газа Российской академии наук, Москва, Россия

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

**E-mail: rodkin@mitp.ru*

Можно думать, что развитие сугубо неравновесных триггерных эффектов в тектоносфере будет связано с ее наиболее изменчивыми компонентами. А наиболее изменчивыми характеристиками тектоносферы Земли, по-видимому, являются характеристики флюидного режима. С развитием флюидного потока связывается как развитие сейсмичности, так и процессы формирования рудных и углеводородных месторождений [4, 5 и др.]. Характер флюидного режима зависит от глубины и характера тектонических процессов. И такую изменчивость можно выявить по сейсмическим и геохимическим данным, в частности, по данным о микроэлементном составе флюидов.

Для землетрясений с глубиной очага примерно от 15–20 до 100 км типична ситуация, когда гипоцентр землетрясения расположен глубже глубины события по решению сейсмического момента, т.е. наблюдается тенденция развития процесса сейсмического разрушения вверх, что естественно связать с тенденцией прорыва легкого флюида вверх по образующейся зоне трещиноватости. Верхняя граница этой области отвечает изменению флюидного давления с субгидростатического на литостатическое. Нижняя граница связана с характерной глубиной развития реакций дегидратации в погружающихся плитах; к этим же глубинам зон субдукции приурочено окончание цепи вулканов. Напротив, для более мелких землетрясений и для событий глубже 100 км характерна тенденция развития сейсмического разрушения вниз, что естественно связать с тенденцией развития неравновесного процесса разрушения в направлении роста температуры. Отмеченные изменения в характере сейсмичности маркируются и изменениями величин кажущихся напряжений в очагах землетрясений.

По данным о микроэлементном (МЭ) составе флюидов (результаты корреляционного анализа по материалам базы данных [2]) четко выявляются две тенденции изменения характера коррелированности МЭ состава флюидов с химическим составом биоты и разных горизонтов земной коры (верхней, средней и нижней) по методологии [3]. Эти две ветви отвечают субвулканическим углекислым флюидам и углеводородным. Это различие отвечает известной концепции П. Н. Кропоткина о существовании двух ветвей дегазации Земли – холодной УВ и горячей углекислой [1]. Обе эти ветви формируются на основе восходящих потоков флюидов, но углекислая связана с областями, затронутыми плюмовой тектоникой, а углеводородная – с процессами погружения блоков в зонах надвигов и при аномально быстром прогибании земной коры.

Литература

1. *Валяев Б.М.* Углеводородная дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений // Геология нефти и газа. 1997. № 9. С. 30–37.
2. *Родкин М.В.* Закономерности микроэлементного состава каустобиолитов и углекислых флюидов по результатам корреляционного анализа, обзор результатов // Актуальные проблемы нефти и газа. 2023. Вып. 3 (42). С. 97–117. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2023-42.art7>
3. *Родкин М.В., Д.В. Рундквист, С.А. Пуланова.* Об относительной роли нижнекоровых верхнекоровых процессов в формировании микроэлементного состава нефтей // Геохимия. 2016. № 11. С. 1025–1031.
4. *Файф У., Прайс Н., Томпсон А.* Флюиды в земной коре. М. : Мир. 1981. – 436 с.
5. Role of water in earthquake generation. Special Issue // Bull. Earth. Res. Inst. 2001. Vol. 76. No 3.

DEEP FLUID FLOWS, SEISMOLOGICAL AND GEOCHEMICAL DATA

M. V. Rodkin*

Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

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

**E-mail: rodkin@mitp.ru*

The development of purely nonequilibrium trigger effects in the tectonosphere appears to be associated with the most variable components. The most variable characteristics of the Earth's tectonosphere are those of the fluid regime. The fluid flow has a crucial role in the seismicity and the formation of ore and hydrocarbon deposits. The main features the deep fluid regime can be identified using seismic and geochemical data, particularly those on the trace microelement composition of fluids.

For earthquakes with focal depths from 15–20 to 100 km, the hypocenter depths are typically deeper than the depths determined by the seismic moment solution. This means that seismic failure tends to develop upward, that can be associated with the tendency for the light fluid to break through upward along the fracture zone. The upper boundary of this region corresponds to a change in fluid pressure from the subhydrostatic to lithostatic. The lower boundary is associated with the characteristic depth of dehydration reactions in subducting plates. Conversely, shallower earthquakes and events deeper than 100 km are characterized by a downward trend in seismic failure, which is associated with the tendency of nonequilibrium failure to develop in the direction of increasing temperature. These changes in seismicity are also marked by changes in the magnitude of apparent stresses values.

According to data on the trace element (TE) composition of fluids (results of a correlation analysis based on database materials and the method), two trends in the correlation of the TE composition of fluids with the chemical composition of biota and the Upper, Middle, and the Lower crust are clearly identified. These two branches correspond to the subvolcanic carbon dioxide fluids and the hydrocarbon fluids. The difference corresponds to the concept of P. N. Kropotkin on the existence of two branches of the Earth's degassing – cold hydrocarbon and hot carbon dioxide. Both of these branches are formed on the ascending fluid flows, but the carbon dioxides are associated with the hot plume tectonic areas, and the hydrocarbons are associated with the crustal block subsidence in thrust zones and during the rapid subsidence of the Earth's crust.

**ПРОГНОЗ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ: ТИПОВЫЕ ПРОГНОЗНЫЕ ПРИЗНАКИ,
РАСШИРЕНИЕ НАБОРА ПРИЗНАКОВ**

М. В. Родкин^{1,*}, А. А. Любушин², Е. В. Липеровская²

¹*Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук, Москва, Россия*

²*Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия*

**E-mail: rodkin@mitp.ru*

Проблема прогноза землетрясений – актуальная задача науки. Научное сообщество прошло путь от надежды на скорое получение прогноза, через как-бы доказательство невозможности прогноза, до доказательства в реальном времени: лучшие алгоритмы прогноза работают много лучше случайного угадывания (но не отвечают практическим требованиям). Препятствиями в получении эффективного прогноза полагаются сильная изменчивость сейсмического режима, отсутствие развитой физической модели сейсмического процесса и неучет различия разноглубинных землетрясений, недостаточное развитие методологии прогноза. По этим вопросам в последнее время был достигнут определенный прогресс.

В результате анализа обобщенной окрестности сильного землетрясения (ООСЗ) был детально описан набор типовых прогнозных аномалий, различающихся для разноглубинных землетрясений [1].

Для мировых ISC-GEM и GCMT и региональных каталогов землетрясений Камчатки и Японии было показано, что для достаточно полных каталогов вероятность выделения в форшоковой зоне целевых M_0+ землетрясений одной и более типовой прогнозной аномалии составляет более 80% (для каталогов с уровнем регистрации $M_c = M_0 - 4$).

Практическая ценность таких прогнозов, однако, существенно снижается большим числом ложных тревог. Одним из возможных путей решения может быть увеличение числа независимых прогнозных признаков. Но насколько надежны такие признаки?

В качестве примера дополнительного признака рассмотрим, вполне типичный, случай сейсмоионосферных аномалий. За сейсмоионосферные аномалии принимают возникновение повышенных или пониженных значений плотности ионизации в пространственно-временной окрестности землетрясений. Теория может служить в исследовании сейсмоионосферных эффектов лишь слабым ориентиром. Поведение ионосферы очень изменчиво; при разных событиях могут наблюдаться самые разные эффекты. Поэтому следует ограничиться случаями статистических аномалий. Но и тогда единообразие результатов не наблюдается.

Для верификации реальности сейсмоионосферных аномалий актуально применение разных статистических подходов на возможно более однородном и качественном массиве данных большой продолжительности. В качестве такого массива используются данные вертикального зондирования по станции Токио за 1957–2020 гг.

Анализ данных проводился методом наложения эпох и новым методом выявления скрытых взаимосвязей между двумя рядами данных. Первый, стандартный, подход показал тенденцию развития положительной аномалии за несколько дней до сейсмического события и отрицательной – после [2 и др.]. Вторым методом [3, 4] выявляются формальные связи между моментами землетрясений и характеристиками данных вертикального зондирования. Наиболее информативными оказались огибающие вейвлет-разложения ряда уровня детальности, отвечающего интервалу времени несколько (2–5) дней. Второй метод так же показал, что землетрясения предшествуют положительные аномалии в данных вертикального зондирования ионосферы, и что землетрясения сопровождаются отрицательными аномалиями. Характерная длительность аномалий и знак аномалий по результатам двух методов совпали.

Вышесказанное указывает на достоверность сейсмоионосферных аномалий и допустимость включения их (аналогично других верифицированных физических предвестников) в алгоритм прогноза на основе типовых ООСЗ аномалий.

Литература

1. Rodkin M.V. A Typical Foreshock and Aftershock Anomaly: Observations, Interpretation, and Applications // Journal of Volcanology and Seismology. 2020. Vol. 14. No. 1. P. 58–69.
2. Rodkin M.V., E.V. Liperovskaya. On the differences in the physical mechanisms of earthquakes at different depths and the nature of their ionospheric response // Physics of the Earth. 2023. No. 3. P. 48–62.
3. Lyubushin A., Rodionov E. Prognostic Properties of Instantaneous Amplitudes Maxima of Earth Surface Tremor // Entropy. 2024. Vol. 26. P. 710. <https://doi.org/10.3390/e26080710>
4. Lyubushin A., Rodionov E. Quantitative Assessment of the Trigger Effect of Proton Flux on Seismicity // Entropy. 2025. Vol. 27. P. 505. <https://doi.org/10.3390/e27050505>

EARTHQUAKE FORECASTING: TYPICAL FORECAST INDICATORS, EXPANSION OF THE SET OF INDICATORS

M. V. Rodkin^{1,*}, A. A. Lyubushin², E. V. Liperovskaya¹

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 the Russian academy of Sciences, Moscow, Russia*

*E-mail: rodkin@mitp.ru

Earthquake forecasting is a pressing scientific challenge. The scientific community has evolved from hoping for a quick forecast, through seemingly demonstrating the impossibility of forecasting, to real-time proof that the best forecasting algorithms perform significantly better than random guessing (but fall short of practical requirements). Obstacles to effective forecasting include the high variability of the seismic regime, the lack of a developed physical model of the seismic process, the failure to account for the differences between earthquakes at different depths, and the insufficient development of forecasting methodology. Some progress has been made recently in these areas.

Analysis of the generalized vicinity of large earthquakes (GVLE) resulted in a detailed description of a set of typical forecast anomalies that differ for earthquakes at different depths. For the global ISC-GEM and GCMT earthquake catalogs and regional earthquake catalogs for Kamchatka and Japan, it was shown that for sufficiently complete catalogs, the probability of identifying one or more typical forecast anomalies in the foreshock zone of target M_0+ earthquakes is over 80% (for catalogs with a recording level of $M_c = M_0 - 4$).

The practical value of such forecasts, however, is significantly reduced by the high number of false alarms. One possible solution may be to increase the number of independent forecast features. But how reliable are such features?

As an example of an additional feature, let's consider the quite typical case of seismoionospheric anomalies. To verify the reality of seismoionospheric anomalies, it is important to apply various statistical approaches to the most homogeneous and high-quality long-term data set possible. Vertical sounding data from the Tokyo station for 1957–2020 is used.

The data was analyzed using the epoch superposition method and the method for identifying hidden relationships between data series. The first, standard approach showed a tendency for a positive anomaly to develop several days before a seismic event and a negative one after. The second method identifies relationships between earthquake timing and vertical sounding data characteristics. The most informative results were obtained from the wavelet decomposition envelopes of a series at a detail level corresponding to a time interval of several (3) days. The second method also showed that earthquakes are preceded by positive anomalies in vertical ionospheric sounding data, and that earthquakes are accompanied by negative anomalies. Both the characteristic duration of the anomalies and the sign of the anomalies were consistent across the two methods.

This indicates the reliability of seismoionospheric anomalies and the admissibility of including them in the forecast algorithm based on GVLE anomalies.

**РЕГИСТРАЦИЯ ГРАДИЕНТОВ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ МЕТОДОМ
ТРАНСИОНОСФЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С КА «ИОНОСФЕРА-М»**

И. В. Романов*, Д. В. Григорьев

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

**E-mail: romanov@ipg.geospace.ru*

В работе обсуждаются эффекты влияния неоднородного распределения концентрации электронов в ионосфере на результаты трансionoсферного радиозондирования (ТИЗ) при пролёте космических аппаратов «Ионосфера-М» над западной частью России. Ионограммы ТИЗ были получены в экспериментах с использованием наземных ионосферных станций Росгидромета (Электроугли, Калининград).

Метод ТИЗ основан на совместной работе наземной ионосферной станции и бортового ионозонда расположенного на космическом аппарате (КА) на околоземной орбите. При этом передатчик бортового ионозонда излучает зондирующие сигналы, а принимает приёмник наземного ионозонда (прямое ТИЗ), или наоборот (обратное ТИЗ). Таким образом возможно измерить значение наименьшей частоты прохождения сигнала сквозь ионосферу на трассе космический аппарат – Земля, которая может быть пересчитана в значение критической частоты f_0F в точке пересечения радиолучом максимума ионосферы. Горизонтальное распределение концентрации электронов можно рассчитать исходя из знания значений критических частот во время проведения нескольких сеансов ТИЗ за один пролёт.

Известно, что учёт значений горизонтальных градиентов (ГГ) электронной концентрации в ионосфере улучшает точность вычислений характеристик ионосферных радиотрасс. Метод ТИЗ позволяет определить ГГ между плоскостью орбиты космического аппарата и местом размещения наземной ионосферной станции. Совместная обработка результатов измерений критических частот области F на ионограммах ТИЗ, внешнего (ВнЗ) и вертикального зондирования (ВЗ) увеличивают геометрические размеры зоны проведения ионосферных измерений.

Эксперимент проводился в период с 20 по 21 декабря 2025 г. В процессе осуществлялось одновременное измерение ионограмм ВнЗ, ВЗ и ТИЗ. В экспериментах были получены серии ионограмм для различных положений и траекторий пролёта КА на орбите. Результаты регистрации показали, что на ионограммах различимы следы прямого и обратного трансionoсферного зондирования, как для ст. Калининград так и для ст. Электроугли, которые позволяют определить критические частоты f_0F в зоне пересечения максимума ионосферы радиолучом. По полученным результатам построено пространственное распределение критической частоты f_0F на траектории движения спутника и определены горизонтальные градиенты плотности электронов.

Экспериментальные результаты подтвердили возможность получения дополнительной информации о распределении критических частот f_0F и значении концентрации электронов, и принципиальную возможность организации ионосферных измерений ГГ с помощью совместного использования космических аппаратов и наземных ионосферных станций. Полученные в эксперименте данные в период с 20 по 21 декабря 2025 г. показывают наличие существенного горизонтального градиента концентрации электронов, который наблюдается в вечерние и утренние часы, как вдоль широты так и долготы. В дневное время наблюдалось значительно меньшее значение градиента концентрации плотности электронов по сравнению с вечерними и утренними часами.

REGISTRATION ELECTRON DENSITY GRADIENTS USING TRANSIONOSPHERIC SOUNDING FROM THE IONOSFERA-M SATELLITES

I. V. Romanov*, D. V. Grigoriev

Fedorov Institute of Applied Geophysics, Moscow, Russia

**E-mail: romanov@ipg.geospace.ru*

This paper discusses the effects of an inhomogeneous electron concentration distribution in the ionosphere on the results of transionospheric sounding (TIS). The study uses data from the passage of the Ionosfera-M satellites over the western part of Russia. The TIS ionograms were obtained during experiments using ground-based ionospheric stations of Roshydromet (Elektrougli and Kaliningrad).

The TIS method is based on the coordinated operation of a ground-based ionospheric station and an onboard ionosonde. The ionosonde is located on a spacecraft in near-Earth orbit. In this setup, the transmitter of the onboard ionosonde emits probing signals. The receiver of the ground-based ionosonde then receives them. This is called direct TIS. The reverse setup is also possible. This method allows scientists to measure the lowest frequency that can pass through the ionosphere on the spacecraft-to-Earth path. This frequency can then be recalculated into the critical frequency (f_0F) at the point where the radio beam crosses the maximum of the ionosphere. The horizontal distribution of electron concentration can be calculated based on the critical frequency values obtained from several TIS sessions during a single flyby.

It is known that accounting for the horizontal gradients of electron concentration improves the accuracy of calculations for ionospheric radio paths. The TIS method makes it possible to determine the horizontal gradient between the satellite's orbit plane and the location of the ground-based ionospheric station. By jointly processing the measurement results of the F-region critical frequencies from TIS ionograms, as well as from external and vertical sounding, the geometric size of the ionospheric measurement area increases.

The experiment was conducted from December 20 to 21, 2025. During this period, ionograms from external, vertical, and transionospheric sounding were measured simultaneously. The experiments produced a series of ionograms for different positions and flight paths of the spacecraft in orbit. The recorded results show that traces of both direct and reverse transionospheric sounding are distinguishable on the ionograms. This was true for both the Kaliningrad and Elektrougli stations. These traces allow scientists to determine the critical frequencies f_0F in the zone where the radio beam intersects the ionosphere's maximum. Based on the obtained results, a spatial distribution of the f_0F critical frequency was constructed along the satellite's trajectory, and the horizontal electron density gradients were determined.

The experimental results confirmed the possibility of obtaining additional information about the distribution of f_0F critical frequencies and electron concentration. They also confirmed the fundamental possibility of organizing ionospheric measurements of horizontal gradients through the combined use of satellites and ground-based ionospheric stations. Data obtained during the experiment from December 20 to 21, 2025, show the presence of a significant horizontal gradient of electron concentration. This gradient was observed in the evening and morning hours, both along latitude and longitude. During the daytime, the value of the electron density gradient was significantly smaller compared to the evening and morning hours.

**ГЕОМАГНИТНЫЕ ВАРИАЦИИ, ПРЕДШЕСТВУЮЩИЕ УРАГАНУ ЭДГАР
(ОБСЕРВАТОРИЯ МОСКВА)**

С. А. Рябова*

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

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

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

Ураган Эдгар обрушился на Москву и Подмоскovie 20 июня 2024 г., принеся шквалистый ветер (до 23–30 м/с), мощные ливни и смерчи. В Москве выпала треть месячной нормы осадков и был заявлен оранжевый уровень опасности. Стихия вызвала серьезные разрушения городской инфраструктуры, были повалены тысячи деревьев, повреждены автомобили.

В настоящем сообщении рассматривается отклик в вариациях восточной горизонтальной компоненты магнитного поля Земли, приуроченных к урагану Эдгар 20 июля 2024 г. Использовались магнитометрические измерения в обсерватории Москва. Предполагалось, что регистрация магнитных сигналов позволит получить дополнительную информацию об источнике и структуре сигналов, регистрируемых микробарографами. При этом основное внимание уделено сигналам, возникающим до момента прихода фронта в точку наблюдения. Для исследования отклика в вариациях восточной горизонтальной компоненты магнитного поля Земли, приуроченных к урагану Эдгар 20 июля 2024 г., была применена полосовая фильтрация Баттерворта 6 порядка в диапазоне 5–90 мин (диапазон атмосферных внутренних волн).

Спектральный анализ на основе вейвлет-преобразования свидетельствует о том, что перед ураганом Эдгар наблюдаются вариации геомагнитного поля в диапазоне от 19 до 68 мин. Это соответствует диапазону атмосферных внутренних гравитационных волн (ВГВ). Сигналы, опережающие приход урагана, могут обладать прогностическим потенциалом.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012700798-8) и государственного задания ИФЗ РАН.

GEOMAGNETIC VARIATIONS PRECEDING HURRICANE EDGAR (MOSCOW OBSERVATORY)

S. A. Ryabova*

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

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian academy of Sciences, Moscow, Russia

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

Hurricane Edgar struck Moscow and the Moscow region on June 20, 2024, bringing gusty winds (up to 23–30 m/s), heavy rainfall, and tornadoes. Moscow received a third of its monthly rainfall, and an orange alert was issued. The storm caused significant damage to urban infrastructure, toppling thousands of trees and damaging cars.

This report examines the response of variations in the eastern horizontal component of the Earth's magnetic field associated with Hurricane Edgar on July 20, 2024. Magnetometric measurements at the Moscow Observatory were used. It was expected that recording magnetic signals would provide additional information about the source and structure of signals recorded by microbarographs. This report focuses on signals generated before the front arrived at the observation point. To study the response of variations in the eastward horizontal component of the Earth's magnetic field associated with Hurricane Edgar on July 20, 2024, sixth-order Butterworth bandpass filtering was applied in the 5–90-minute range (the range of atmospheric internal waves).

Spectral analysis based on the wavelet transform indicates that geomagnetic field variations in the 19–68-minute range are observed ahead of Hurricane Edgar. This corresponds to the range of atmospheric internal gravity waves (IGWs). Signals preceding the hurricane's arrival may have predictive potential.

ПРОГНОЗ НА ОСНОВЕ LSTM МОДЕЛИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА НА ГОРЕ ЦУГШПИТЦЕ

С. А. Рябова*

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

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

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

Знание прогноза погоды является важной информацией для различных сфер человеческой деятельности. Точность прогнозов имеет решающее значение для эффективного управления чрезвычайными ситуациями, смягчения последствий экономических потерь и содействия получению доходов в ключевых секторах, таких как энергетика, сельское хозяйство и транспорт. Прогностические модели все время совершенствуются, повышается точность прогнозирования различных процессов. Таким образом, тема прогнозирования метеорологических величин остается актуальной.

Период с 2023 по 2027 гг. провозглашен Генеральной Ассамблеей ООН «Пятилетием действий по развитию горных регионов». Климат горных районов уникален и сильно отличается от климата прилегающих равнин. В связи с этим представляется важным исследование климатических особенностей высокогорных регионов, а также прогнозирование их изменений.

В настоящем сообщении рассматриваются результаты применения LSTM модели (тип рекуррентных нейронных сетей) с долгой кратковременной памятью для прогнозирования температуры воздуха. В рамках исследований выполняется прогноз изменения температуры воздуха для Альпийского региона на примере данных метеостанции на горе Цугшпитце (47°25'00" с.ш., 10°58'59" в.д.).

При выполнении настоящих исследований для обучения модели были использованы данные за период с 1901 по 2019 гг., для тестирования модели прогноза данные за период с 2020 по 2024 гг. По модели делался прогноз на период с 2025 по 2029 гг.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012700798-8) и в рамках государственного задания ИФЗ РАН.

LSTM-BASED FORECAST OF AIR TEMPERATURE CHANGES ON THE ZUGSPITZE MOUNTAIN

S. A. Ryabova*

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

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian academy of Sciences, Moscow, Russia

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

Weather forecasts provide essential information for various areas of human activity. Accurate forecasts are crucial for effectively managing emergency situations, mitigating economic losses, and facilitating revenue generation in key sectors such as energy, agriculture, and transportation. Forecasting models are constantly being improved, increasing the accuracy of forecasting various processes. Therefore, forecasting meteorological variables remains a pressing issue.

The period from 2023 to 2027 has been proclaimed by the UN General Assembly as the «Five Years of Action for the Development of Mountain Regions.» The climate of mountain regions is unique and differs significantly from that of the adjacent lowlands. Therefore, it is important to study the climatic characteristics of high-mountain regions and predict their changes.

This paper discusses the results of applying an LSTM model (a type of recurrent neural network) with long short-term memory to air temperature forecasting. This study forecasts air temperature changes for the Alpine region using data from the Zugspitze weather station (47°25'00" N, 10°58'59" E).

Data from 1901 to 2019 was used to train the model, and data from 2020 to 2024 was used to test the forecast model. The model was used to generate forecasts for the period 2025 to 2029.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРНО-ИОНОСФЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ

**И. А. Ряховский*, Ю. В. Поклад, Б. Г. Гаврилов, С. З. Беккер, В. М. Ермак,
А. И. Сапунова, В. С. Лобанова, Г. А. Лесников**

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: ryakhovskiy88@gmail.com*

Процессы электромагнитного и корпускулярного воздействия Солнца на состояние и динамику верхних геосфер активно исследуются в современной науке. Это необходимо как для развития фундаментальных представлений о механизмах таких воздействий, так и для разработки практических мер по снижению их негативного влияния на критически важные системы – технологические, управляющие, энергетические, навигационные и связные. Особую актуальность эти исследования приобретают в условиях роста солнечной активности, когда выбросы корональной массы и вспышки на Солнце могут вызывать сильные геомагнитные бури, нарушающие работу спутниковых систем, линий электропередач и средств радиосвязи.

Наиболее информативным методом изучения этих явлений признаны радиофизические методы, поскольку состояние ионосферы существенно влияет на распространение электромагнитных сигналов. Изменения электронной концентрации, появление неоднородностей и волновых структур в ионосфере приводят к искажениям радиосигналов, что позволяет использовать их как инструмент диагностики геофизических процессов.

Для реализации таких исследований в ИДГ РАН применяется уникальный радиофизический комплекс, включающий средства измерения: геомагнитных и геоэлектрических полей; параметров радиосигналов КНЧ/ОНЧ–диапазона; сигналов глобальных навигационных спутниковых систем. Многолетние радиофизические наблюдения позволили нам разработать уникальные методики восстановления высотного профиля электронной концентрации и определения коэффициентов ионизации и рекомбинации в D- и E-областях ионосферы. Полученные экспериментальные данные послужили основой для верификации плазмохимических моделей Института и позволили выявить закономерности взаимосвязанных процессов возмущений в верхней и нижней ионосфере.

Перспективными направлениями работы института являются совершенствование методов обработки и анализа экспериментальных данных, создание собственных измерительных средств на отечественной элементной базе и разработка высокоэффективной и надёжной регистрирующей аппаратуры для перспективных геофизических измерительных сетей на территории РФ – в интересах фундаментальных и прикладных научных исследований.

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

EXPERIMENTAL RADIOPHYSICAL STUDIES OF ATMOSPHERIC-IONOSPHERIC EFFECTS OF SOLAR-TERRESTRIAL CONNECTIONS

**I. A. Ryakhovsky*, Yu. V. Poklad, B. G. Gavrilov, S. Z. Bekker, V. M. Ermak,
A. I. Sapunova, V. S. Lobanova, G. A. Lesnikov**

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

** E-mail: ryakhovskiy88@gmail.com*

The processes of electromagnetic and corpuscular influence of the Sun on the state and dynamics of the upper geospheres are being actively studied in modern science. This is necessary both for developing fundamental understanding of the mechanisms of such influences and for devising practical measures to mitigate their

negative impact on critically important systems – technological, control, energy, navigation, and communication systems. These studies become particularly relevant during periods of increasing solar activity, when coronal mass ejections and solar flares can cause severe geomagnetic storms that disrupt the operation of satellite systems, power lines, and radio communication facilities.

Radiophysical methods are recognized as the most informative approach for studying these phenomena, since the state of the ionosphere significantly affects the propagation of electromagnetic signals. Changes in electron concentration, the appearance of inhomogeneities and wave structures in the ionosphere lead to distortions of radio signals, which allows them to be used as a tool for diagnosing geophysical processes.

To conduct such research, the Institute of Geosphere Dynamics of the Russian Academy of Sciences (IDG RAS) employs a unique radiophysical complex comprising instrumentation for measuring: geomagnetic and geoelectric fields; parameters of VLF/ELF range radio signals; signals from global navigation satellite systems. Long-term radiophysical observations have enabled us to develop unique methods for reconstructing the altitude profile of electron concentration and determining ionization and recombination coefficient in the D and E regions of the ionosphere. The obtained experimental data have served as a basis for verifying the institute's plasma-chemical models and have allowed us to identify patterns of interrelated perturbation processes in the upper and lower ionosphere.

Promising directions for the institute's work include improving methods for processing and analyzing experimental data, developing our own measurement tools using domestic electronic components, and creating highly efficient and reliable recording equipment for advanced geophysical measurement networks across the Russian Federation – in the interests of fundamental and applied scientific research.

ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОГЛОЩЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН НА ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЕ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ В ОБСЕРВАТОРИИ «МИХНЕВО»: ПОПЫТКА ИНТЕРПРЕТАЦИИ

И. А. Санина^{1,*}, М. В. Родкин²

¹Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

²Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: iasanina51@gmail.com

Многолетние непрерывные наблюдения за сейсмическими событиями на малоапертурной группе (МСГ «Михнево») позволили построить ряды вариаций динамических параметров сейсмических волн в частотном диапазоне 3–9 Гц для двух трасс: Михнево–карьер Новогуровский и Михнево–карьеры в районе г. Коломны. Установленные временные тренды значений отношений максимальных амплитуд поперечных волн к продольным – $\lg(AS_{\max}/AP_{\max})$ ранее были интерпретированы в терминах геологического строения среды. Было показано [1], что систематически меньшие значения $AS_{\max}/AP_{\max}$ по трассе Новогуровский–Михнево относительно трассы Михнево–Коломна могут быть связаны с Нелидово–Рязанской шовной зоной.

Ниже сделаны попытки более детального рассмотрения временной изменчивости величин $\lg(AS_{\max}/AP_{\max})$. Число взрывов за равные промежутки времени значительно меняется, поэтому рассматривался режим изменения величин $\lg(AS_{\max}/AP_{\max})$ в событийной шкале по времени. Сразу же отметим, что амплитуда величин $AS_{\max}$ и $AP_{\max}$ на обеих трассах изменяется в пределах 4–5 порядков величины, но значения отношения $\lg(AmpS_{\max}/AmpP_{\max})$ при этом не изменяются, то есть нелинейными эффектами можно пренебречь. В событийной шкале по времени оказалось возможным более детально проследить изменчивость отношений $\lg(AS_{\max}/AP_{\max})$ по трассам Новогуровский–Михнево и Коломна–Михнево.

Линейный тренд по трассе Коломна–Михнево оказался менее выраженным, но при этом выявились общие тенденции изменения анализируемых величин по обеим трассам. Отмечается сильная длиннопериодная и слабая квази-сезонная изменчивость. Длиннопериодная изменчивость $\lg(AS_{\max}/AP_{\max})$ не монотонна, с максимумами в 2013–2014 гг. и 2017–2019 гг. Амплитуда квази-сезонной изменчивости $\lg(AS_{\max}/AP_{\max})$ составляет до 5% от разброса индивидуальных значений и до трети изменчивости осредненных по времени значений $\lg(AS_{\max}/AP_{\max})$. При этом квази-сезонные изменения величин $\lg(AS_{\max}/AP_{\max})$ и скоростей GPS деформаций (по обсерватории «Михнево») [2] противофазны. Но большие значения отношения $\lg(AS_{\max}/AP_{\max})$ отвечают меньшему поглощению волн V_s , то есть, в тенденции, меньшим значениям модуля сдвига. А меньшие значения модуля сдвига отвечают большей деформируемости геофизической среды. То есть, наблюдаемая связь квази-сезонной изменчивости величин $\lg(AS_{\max}/AP_{\max})$ и скоростей GPS деформаций представляется качественно понятной.

Обсудим возможную связь не сезонной изменчивости величин $\lg(AS_{\max}/AP_{\max})$ с сейсмическим режимом. Для этого отберем землетрясения с максимальным отношением размера очага к расстоянию до обсерватории «Михнево». Все эти события располагаются в южных и юго-восточных азимутах от обсерватории. Для интервала времени большего числа взрывов 2010–2020 гг. наблюдается два максимума числа таких землетрясений – в 2014 и 2018 гг. Эти интервалы отвечают отмеченным выше максимумам величин $\lg(AS_{\max}/AP_{\max})$. Предварительно можно предположить, что рост величин отношения $\lg(AS_{\max}/AP_{\max})$ отвечает временам прохода деформационных (тектонических) волн, порождаемых активизациями сейсмичности на южной границе Евразийской плиты.

В целом можно заключить, что наблюдаемые вариации отношения $\lg(AmpS_{\max}/AmpP_{\max})$ представляются естественно интерпретируемыми и позволяющими продвинуться в понимании геодинамики платформенных областей, оказывающихся не столь пассивными.

Работа выполнена в рамках гос. задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема №125012200561-3).

Литература

1. Санина И.А., Иванченко Г.Н., Константиновская Н.Л., Усольцева О.А. Временные вариации динамических характеристик сейсмических волн и их связь с геолого-структурными условиями центра восточно-европейской платформы // Вопросы инженерной сейсмологии. 2024. Т. 51. № 4. С. 73–84.
2. Гаврилов Б.Г., Санина И.А., Константиновская Н.Л., Овчинникова О.В. Синхронные наблюдения смещения координат ГФО «Михнево» по данным GPS станции и вариаций кинематических и динамических параметров сейсмических волн // Динамические процессы в геосферах. 2024. Т. 16. № 1. С. 1–7.

TEMPORAL VARIABILITY OF SEISMIC WAVE ATTENUATION ON THE EAST EUROPEAN PLATFORM BASED ON OBSERVATIONS AT THE MIKHNEVO OBSERVATORY: AN ATTEMPT AT INTERPRETATION

I. A. Sanina^{1,*}, M. V. Rodkin²

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

²Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of Russian academy of sciences, Moscow, Russia

*E-mail: iasanina51@gmail.com

Long-term continuous observations of seismic events using a small-aperture seismic array (SASA «Mikhnevo») made it possible to construct series of variations in the dynamic parameters of seismic waves in the frequency range of 3–9 Hz along two paths : Mikhnevo–Novogurovsky quarry and Mikhnevo–quarries near the city of Kolomna. The established time trends in the values of the ratios of the maximum amplitudes of shear waves to longitudinal ones – $\lg(AS_{\max}/AP_{\max})$ were previously interpreted in terms of the geological structure of the environment.

Below, attempts are made to examine the temporal variability of the $\lg(AS_{\max}/AP_{\max})$ values in more detail. The number of explosions over equal time intervals varies significantly, so the behavior of $\lg(AS_{\max}/AP_{\max})$ values on an event-based time scale was examined.

The linear trend along the Kolomna-Mikhnevo path was less pronounced, but general trends in the changes in the analyzed quantities were revealed along both paths. Strong long-period and weak quasi-seasonal variability are observed. The long-period variability of $\lg(AS_{\max}/AP_{\max})$ is non-monotonic, with maxima in 2013–2014 and 2017–2019. The amplitude of the quasi-seasonal variability of $\lg(AS_{\max}/AP_{\max})$ accounts for up to 5% of the scatter of individual values and up to a third of the variability of time-averaged $\lg(AS_{\max}/AP_{\max})$ values. Moreover, the quasi-seasonal changes in $\lg(AS_{\max}/AP_{\max})$ values and GPS deformation rates (at the «Mikhnevo» station) are out of phase. However, higher values of the $\lg(AS_{\max}/AP_{\max})$ ratio correspond to lower V_s -wave absorption; that is, they tend to correspond to lower values of the shear modulus. Lower shear modulus values correspond to greater deformability of the geophysical environment. Thus, the observed relationship between the quasi-seasonal variability of $\lg(AS_{\max}/AP_{\max})$ and GPS deformation rates appears qualitatively clear.

Let's discuss a possible connection between non-seasonal variability in $\lg(AS_{\max}/AP_{\max})$ and seismic regimes. For this purpose, we will select earthquakes with the maximum focal size to distance ratio to the «Mikhnevo» Observatory. All these events are located at southern and southeastern azimuths from the observatory. For the time interval of the largest number of explosions, 2010–2020, two peaks in the number of such earthquakes are observed – in 2014 and 2018. These intervals correspond to the noted above maxima in $\lg(AS_{\max}/AP_{\max})$. It can be tentatively assumed that the increase in $\lg(AS_{\max}/AP_{\max})$ corresponds to the transit times of deformation (tectonic) waves generated by seismic activity at the southern boundary of the Eurasian Plate.

In general, it can be concluded that the observed variations in the $\lg(AmpS_{\max}/AmpP_{\max})$ ratio appear to be naturally interpretable and allow us to advance our understanding of the geodynamics of platform regions that are not so passive.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЛИВНОГО ВЛИЯНИЯ ЛУНЫ НА ИОНОСФЕРУ
ПО ДАННЫМ ГФО «МИХНЕВО»**

А. И. Сапунова*, И. А. Ряховский, Ю. В. Поклад, В. С. Лобанова

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

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

Непрерывные наблюдения в геофизической обсерватории (ГФО) «Михнево» (54.9° N, 37.7° E) ведутся с 2014 г. По результатам регистрации сигналов ГНСС было восстановлено абсолютное значение полного электронного содержания (ПЭС).

Фурье анализ многолетнего ряда данных позволил выявить основные периодические вариации и оценить амплитуды и фазы соответствующих гармоник. Обнаружены ожидаемые периодические вариации: полусуточные, обусловленные лунными приливами, суточные, связанные с прохождением терминатора. Также наблюдалась гармоника, вызванная дифференциальным вращением Солнца (с периодом 27 суток). Наиболее значимым результатом является обнаружение гармоника с периодом 29.5 суток, совпадающим с синодическим лунным месяцем. Данная мода синхронна с лунными фазами (максимум соответствует полнолунию, минимум – новолунию). Кроме того, выявлена гармоника с периодом 14.7 суток, свидетельствующая о проявлении сизигийных приливов в верхних слоях ионосферы.

Для оценки проявления приливных эффектов, происходящих в нижних слоях ионосферы были рассмотрены вариации амплитудно-фазовых характеристик сигналов СДВ-станции GBZ (54.91° N, 3.28° W). Для определения периодов вариаций сигналов СДВ-станций был применен метод построения спектров Ломба–Скаргла. Этот метод позволяет анализировать неравномерные ряды данных. Для построения периодограммы использовались моменты времени, когда рассматриваемая трасса GBZ – «Михнево» была полностью освещена. По результатам анализа в нижних слоях ионосферы не зафиксированы гармоника с периодами 29.5 и 14.7 суток. Это может быть связано с малым вкладом приливных эффектов для D-области ионосферы.

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

STUDY OF LUNAR TIDAL INFLUENCE ON THE IONOSPHERE BASED ON MIKHNEVO GEOPHYSICAL OBSERVATORY DATA

A. I. Sapunova*, I. A. Ryakhovsky, Yu. V. Poklad, V. S. Lobanova

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

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

Continuous observations at the mid-latitude Geophysical Observatory (GO) «Mikhnevo» (54.9° N, 37.7° E) have been conducted since 2014. Based on GNSS signal recordings, the absolute value of the total electron content (TEC) was retrieved.

Fourier analysis of the multi-year time series enabled the identification of the main periodic variations and the estimation of the amplitudes and phases of the corresponding harmonics. Expected periodic variations were detected: semidiurnal ones due to lunar tides, diurnal ones associated with the terminator passage. A harmonic caused by the differential rotation of the Sun (with a period of 27 days) was also observed. The most significant result is the detection of a harmonic with a period of 29.5 days, coinciding with the synodic lunar month. This mode is synchronous with lunar phases (maximum corresponding to full moon, minimum to new moon). Additionally, a harmonic with a period of 14.7 days was identified, indicating the manifestation of syzygy tides in the upper ionospheric layers.

To assess the manifestation of tidal effects occurring in the lower ionospheric layers, variations in the amplitude-phase characteristics of signals from the VLF station GBZ (54.91° N, 3.28° W) were examined.

The Lomb–Scargle periodogram method was applied to determine the periods of VLF station signal variations. This method allows analysis of unevenly spaced data. For constructing the periodogram, time moments were used when the GBZ–«Mikhnevo» path was fully illuminated. The analysis results showed no harmonics with periods of 29.5 and 14.7 days in the lower ionospheric layers. This may be related to the small contribution of tidal effects to the D-region of the ionosphere.

ВОЗМОЖНОСТИ ДОЗИМЕТРОВ RDS-31S ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ МОНИТОРИНГА ПРИРОДНОГО РАДИАЦИОННОГО ФОНА У ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Д. Г. Сахибгареев*, Н. П. Романов, О. И. Озол

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-производственное объединение «Тайфун», Обнинск, Россия

*E-mail: dgtyphoon@yandex.ru

Представлены результаты мониторинга радиационного гамма-фона на различных высотных уровнях относительно поверхности Земли, полученные с помощью дозиметров модели RDS-31S. Данные дозиметры, обладая большим объемом энергонезависимой памяти, дают возможность получать пространственное распределение усредненных значений радиационного фона по измерениям в различных точках или же временной ход радиационного фона в выбранной точке измерения.

При измерениях в шурфах (до 2-х м глубиной), проведенных в окрестностях городов Обнинска, Ангарска и Петропавловска-Камчатского, выявлена общая закономерность повышения мощности гамма-радиации от поверхности земли до глубины 60–80 см и ее дальнейшего спада с увеличением глубины. Распределение показаний дозиметров по глубине прямо связано с концентрацией радона. Для получения высотного хода мощности гамма-радиации в диапазоне высот от поверхности земли и до высоты 301 м с шагом около 25 метров была использована высотная метеомачта ФГБУ «НПО «Тайфун», на балконах которой размещались дозиметры. Показано, что мощность радиационного гамма-фона от поверхности земли уменьшается с высотой, достигая своего минимума на высоте около 300 м, на которой минимальное значение усредненной мощности радиационного гамма-фона составляет около 0.03 мкЗв/ч, что очень близко к значению мощности эффективной дозы, обусловленной ионизирующей компонентой космического излучения в атмосфере на уровне моря в средних широтах, равного 0.031–0.033 мкЗв/ч. На основании проведенных высотных измерений гамма-фона сделан вывод, что на высотах более 300 м влиянием земных источников гамма-радиации можно пренебречь.

Измерения мощности гамма-радиации на высоте 301 м, на фоне низких фоновых значений, позволяют регистрировать слабые возмущения радиационного фона, которые можно, в некоторых случаях, объяснить воздействием природных источников, в частности солнечными вспышками, сопровождающимися излучениями в рентгеновском и мягком гамма-диапазонах. Приведены примеры регистраций природных возмущений с указанием даты, временного графика и «розы ветров». С интернет-ресурса www.xras.ru представлены графики солнечных вспышек в этот период времени и их классификация.

RDS-31S DOSIMETER CAPABILITIES FOR MONITORING THE NATURAL RADIATION BACKGROUND NEAR THE EARTH'S SURFACE

D. G. Sakhibgareev*, N. P. Romanov, O. I. Ozols

Scientific and Production Association «Typhoon», Obninsk, Russia

*E-mail: dgtyphoon@yandex.ru

The article presents the results of monitoring the gamma radiation background at various altitudinal levels relative to the Earth's surface, obtained by using RDS-31S model dosimeters. These dosimeters, having a large amount of non-volatile memory, provide the possibility to get a spatial distribution of the average values of the radiation background from measurements at various points or the time course of the radiation background at the selected measurement point.

Measurements in pits (up to 2 m deep) carried out in the vicinity of Obninsk, Angarsk and Petropavlovsk-Kamchatsky cities revealed a general pattern of increasing gamma radiation power from the Earth's surface to a depth of 60–80 cm and its further decrease with increasing depth. The depth distribution of dosimeter

readings is directly related to the radon concentration.

The high-altitude weather tower of FSBI «RPA «Typhoon» with dosimeters placed on its balconies was used to obtain a high-altitude course of gamma radiation power in the altitude range from the Earth's surface to a height of 301 m in increments of about 25 meters.

It is shown that the power of the gamma-ray background radiation from the Earth's surface decreases with altitude, reaching its minimum at an altitude of about 300 m, at which the minimum value of the average power of the gamma-ray background radiation is about $0.03 \mu\text{Sv/h}$, which is very close to the value of the effective dose rate due to the ionizing component of cosmic radiation in the atmosphere at sea level in the middle latitudes, equal to $0.031\text{--}0.033 \text{ mSv/h}$. Based on the altitude measurements of the gamma background, it is concluded that at altitudes of more than 300 m, the influence of terrestrial sources of gamma radiation can be neglected.

Measurements of gamma radiation power at an altitude of 301 m, against a background of low background values, make it possible to register weak disturbances in the radiation background, which can, in some cases, be explained by exposure to natural sources, in particular solar flares accompanied by radiation in the X-ray and soft gamma ranges. Examples of natural disturbance registrations with dates, time schedules, and «wind roses» are given. From the online resource www.xras.ru presents graphs of solar flares during this time period and their classification.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОЧАГОВ СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ КАМЧАТСКОГО МЕГАЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

А. А. Скоркина^{1,*}, А. А. Остапчук², Д. В. Чебров³, П. Н. Шебалин¹

¹Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук, Москва, Россия

²Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

³Камчатский филиал Федерального Исследовательского Центра Единой Геофизической Службы, Петропавловск-Камчатский, Россия

*E-mail: anna@mitp.ru

Камчатское мегаземлетрясение M_w 8.8 29 июля 2025 г. стало первым землетрясением, записанным сетью акселерометров в ближней зоне за всю историю сейсмических наблюдений на Камчатке, тем самым пополнив мировую коллекцию акселерограмм сильнейших землетрясений планеты. Ранее также в ближней зоне были записаны Мауле (Чили, 27 февраля 2010 г. $M_w = 8.8$) [1], Тохоку (Япония, 11 марта 2011 г. $M_w = 9.0$) [2], и Кайкоурское землетрясение (Новая Зеландия, 14 ноября 2016 г. $M_w = 7.8$) [3]. 29 июля без сбоя отработали более 30 станций, укомплектованных акселерометрами (считая группы вблизи Крутоберегово, Петропавловска-Камчатского и Северо-Курильска), полученных из 17 точек наблюдения. При этом 6 акселерометров (NLC, KRM, RUS, KDT, PAU, SKR) и 13 акселерометров Петропавловского куста (на территории г. Петропавловска-Камчатского и ближайших окрестностей) оказались расположены непосредственно вблизи развивающегося очагового процесса на расстояниях менее 100 км от значимых регистрируемых смещений, что позволило посекундно рассмотреть начало очагового процесса мегаземлетрясения с разных азимутов относительно первой точки вспарывания. Для Камчатского мегаземлетрясения 2025 г. впервые появилась возможность оценить очаговую длительность непосредственно по записям – от 23:25:11 UTC (по первым вступлениям на станциях Петропавловского куста) до 23:28:56 UTC (последних значимых амплитуд на станции SKR), суммарно 225 секунд. Количество вступлений на акселерограммах значительно превышает ожидаемые на близких записях для односегментных разрывов два вступления (продольной и поперечной волн). Предположительно выделяется не менее четырех пар вступлений: продольные волны первого и второго сегмента, а также поперечные волны четырех сегментов (продольные волны для третьего и четвертого сегментов выделяются не всегда в связи с наложением на более сильные вступления поперечных волн от первых сегментов). Таким образом, анализ акселерограмм ближней зоны показал, что вопрос о максимально возможной магнитуде остается открытым, потому что односегментного землетрясения с $M \geq 8.5$ в мире еще зарегистрировано не было. Акселерограммы мегаземлетрясений 2010 г. (Япония), 2011 г. (Чили) и 2025 г. (Россия) показали мультисегментные очаги – группы землетрясений, тесно концентрированные во времени и пространстве. При этом важно отметить, что многосегментность не является характерной только для мегаземлетрясений, и может встречаться и при более слабых магнитудах. Например, в случае с Кайкоурским землетрясением (Новая Зеландия, 14 ноября 2016 г. $M_w = 7.8$) были отмечены разрывы на 21 сегменте.

Литература

1. Pulido N., Sekiguchi T., Shoji G. et al. Earthquake source process and strong ground motions of the 2010 Chile mega-earthquake // Tsukuba: National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention. 2010.
2. Furumura T., Takemura S., Noguchi S. et al. Strong ground motions from the 2011 off-the Pacific-Coast-of-Tohoku, Japan ($M_w=9.0$) earthquake obtained from a dense nationwide seismic network // Landslides. 2011. Vol. 8. P. 333–338. <https://doi.org/10.1007/s10346-011-0279-3>
3. Ulrich T., Gabriel A.A., Ampuero J.P. et al. Dynamic viability of the 2016 M_w 7.8 Kaikōura earthquake cascade on weak crustal faults // Nature communications. 2019. Vol. 10. № 1. P. 1213. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09125-w>

CHARACTERISTICS OF THE SOURCES OF THE STRONGEST EARTHQUAKES USING THE EXAMPLE OF THE KAMCHATKA MEGAEARTHQUAKE

A. A. Skorkina^{1,*}, A. A. Ostapchuk², D. V. Chebrov³, P. N. Shebalin¹

¹*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of Russian academy of sciences, Moscow, Russia*

²*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³*Kamchatka Branch of Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

*E-mail: anna@mitp.ru

The Kamchatka megaequake with M_w 8.8 on July 29, 2025, became the first earthquake recorded by the accelerometer network in the near-field zone in the entire history of seismic observations in Kamchatka, thereby expanding the world collection of accelerograms of the strongest earthquakes on the planet. Previously, the Maule earthquake (Chile, February 27, 2010, $M_w = 8.8$), the Tohoku earthquake (Japan, March 11, 2011, $M_w = 9.0$), and the Kaikoura earthquake (New Zealand, November 14, 2016, $M_w = 7.8$) were also well recorded in the near-field zone. On July 29, more than 30 stations equipped with accelerometers (including arrays near Krutoberegovo, Petropavlovsk-Kamchatsky, and Severo-Kurilsk) operated properly, receiving data from 17 observation points. Six accelerometers (NLC, KRM, RUS, KDT, PAU, SKR) and 13 accelerometers from the Petropavlovsk cluster (in the city of Petropavlovsk-Kamchatsky and its surrounding area) were located directly near the developing rupture process, at distances less than 100 km from significant recorded displacements. This allowed for second-by-second resolution of the mega-earthquake's source process from various azimuths relative to the initial rupture point. For the 2025 Kamchatka megaequake, it became possible for the first time to estimate the focal duration directly from records – from 23:25:11 UTC (based on the first arrivals at the Petropavlovsk earthquake cluster) to 23:28:56 UTC (the last significant amplitudes at the SKR station), for a total of 225 seconds. The number of arrivals on the accelerograms significantly exceeds the two arrivals (P-wave and S-wave) expected for nearby records for single-segment ruptures. Presumably, at least four pairs of arrivals are distinguished: P-waves from the first and second segments, as well as S-waves from four segments (P-waves for the third and fourth segments are not always distinguished due to the superposition of S-waves from the first segments on the stronger arrivals). Thus, an analysis of near-field accelerograms revealed that the maximum possible magnitude remains questionable yet, as a single-segment earthquake with $M \geq 8.5$ has not yet been recorded worldwide. Accelerograms of the megaquakes of 2010 (Japan), 2011 (Chile), and 2025 (Russia) revealed multi-segment sources of earthquakes densely concentrated in time and space. It is important to note that multi-segmentality is not unique to megaquakes and can also occur at lower magnitudes. For example, in the case of the Kaikoura earthquake (New Zealand, November 14, 2016, $M_w = 7.8$) 21 segments have been worked out.

ИНДУЦИРОВАННЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ЗАПАДНОГО АЛТАЯ

И. Н. Соколова^{1,*}, А. Е. Великанов², И. Л. Аристова²

¹Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Обнинск, Россия

²Институт геофизических исследований Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан

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

Район Западного Алтая характеризуется умеренным уровнем сейсмичности, максимальная интенсивность сейсмических проявлений составляла 6–7 баллов по шкале МСК64. В этом районе находится большое количество населенных пунктов, объектов горнодобывающей промышленности, а также предприятие атомной промышленности: Банк низкообогащённого урана (БНОУ). В связи с этим, изучение сейсмической опасности от возможных проявлений природных и техногенных землетрясений на этой территории важно для безопасности населения, экологии и критической инфраструктуры.

15 февраля 1965 г. в 19:50 местного времени в районе Кулундинской степи, вблизи г. Камень-на-Оби, произошло одно из самых интересных землетрясений Западного Алтая с координатами эпицентра $\varphi = 53.633$, $\lambda = 81.533$. По действующей в то время схеме сейсмического районирования СССР этот район относился к 5-балльной зоне. Тем не менее, интенсивность сильного Каменского землетрясения ($m_b = 5.7$, $K_r = 13.4$) достигла 7 баллов в эпицентральной зоне. А в серии землетрясений с апреля по июль 1964 г., наиболее сильное из них землетрясение – 12 июля 1964 г., ощущалось в нескольких населенных пунктах интенсивностью 6 баллов. После кратковременных активизаций 1964 и 1965 гг. в этом районе наблюдается длительный период затишья. В настоящее время в районе в течение нескольких десятилетий наблюдается слабая сейсмическая активность. За период до марта 2026 г. было зарегистрировано лишь 2 землетрясения с энергетическим классом около 11.

Изучение геоморфологических, геодинамических и климатических факторов, обусловивших Каменские землетрясения 1964–1965 гг. показало, что наиболее вероятной причиной, на наш взгляд, является образование дополнительной избыточной водной массы из атмосферных осадков в локализованном месте в течение двух лет, как дополнительной большой нагрузки на недра в земной коре. Широкая пойма р. Обь, размерами 100×20 км восточнее г. Камень-На-Оби, испещрена старицами, протоками и озёрами с громадным запасом поверхностных и подземных вод. И этот пойменный резервуар подземных вод в своей западной части около г. Камень-На-Оби подпёрт скальными выходами коренных пород. По данным метеостанции в г. Новосибирске 1962 и 1963 годы отметились малым уровнем осадков, ниже нормы в течение года, а 1964 и 1965 гг. отметились большим уровнем осадков выше нормы. Это способствовало быстрому созданию дополнительной избыточной водной массы (относительно 1962–1963 гг.) в широкой пойме р. Обь к востоку от г. Камень-На-Оби, где и произошло сильное землетрясение 15 февраля 1965 г. Кроме того, Каменское землетрясение произошло за день до новолуния 16 февраля, что послужило дополнительным триггером. Для самого сильного сейсмического события активизации 15.02.1965 г. на основе анализа большого количества исторических аналоговых сейсмограмм было проведено уточнение параметров землетрясения, построен фокальный механизм.

Другим интересным примером наведенной сейсмичности является сильное землетрясение в Восточном Казахстане в Абайской области 23.07.2025 г. ($m_{pv} = 5.6$, $K_r = 12.9$). Землетрясение ощущалось во многих населенных пунктах Казахстана и России. Анализ показал, что с большой вероятностью оно индуцировано избыточным количеством атмосферных осадков, которые скопились в пространстве русла р. Былкылдак, нарушенного горнодобывающими работами на россыпное золото.

INDUCED EARTHQUAKES IN WESTERN ALTAI

I. N. Sokolova^{1,*}, A. E. Velikanov², I. L. Aristova²

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

²*Institute of Geophysical Research of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan*

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

The Western Altai region is characterized of moderate seismicity level, with maximum seismic intensity reaching 6–7 by the MSC-64 scale. This region contains numerous settlements, mining facilities, and a nuclear facility, the Low Enriched Uranium (LEU) Bank. Therefore, studying the seismic hazard from potential tectonic and induced earthquakes in this area is important for the safety of the population, the environment, and critical infrastructure.

On February 15, 1965, at 19:50 local time, in the Kulunda steppe region, near the town of Kamen-na-Obi, one of the most interesting earthquakes in the Western Altai occurred with the epicenter coordinates $\varphi = 53.633$, $\lambda = 81.533$. According to the seismic zoning map of the USSR at that time, this region belonged to the zone with Intensity 5. Nevertheless, the intensity of the strong Kamenskoye earthquake ($m_b = 5.7$, $K_p = 13.4$) reached Intensity I = 7 at the epicentral zone. Earthquake of July 12, 1964 was strongest event in a seismic swarm of during the 1964 April-July and felt in several populated areas with an Intensity I = 6. After short-term activations in 1964 and 1965, a long period of calm was observed in this region. The area has experienced low seismic activity for several decades. Until March 2026, only two earthquakes with an $K_p \sim 11$ were registered.

A study of the geomorphological, geodynamic, and climatic factors that caused the Kamensky earthquakes of 1964–1965 has shown that the most likely reason, in our opinion, is the formation of additional excess water from precipitation in this area over two years, placing an additional significant load on the Earth's crust subsoil. The wide (100 by 20 km) Ob River floodplain, measuring east of Kamen-na-Obi, is dotted with oxbow lakes, channels, and lakes containing enormous reserves of surface and groundwater. This floodplain groundwater reservoir, in its western part near Kamen-na-Obi, is backed by bedrock outcrops. According to weather station data in Novosibirsk, 1962 and 1963 were marked by low precipitation, below normal, while 1964 and 1965 were marked by high precipitation, above normal. This contributed to the rapid creation of an additional excess water mass (relative to 1962–1963) in the wide Ob River floodplain east of Kamen-na-Obi, where a strong earthquake 15.02.1965 occurred. Furthermore, the Kamenskoye earthquake occurred the day before the new moon on February 16, which provided an additional trigger. We analyzed of a large number of historical analog seismograms of 15.02.1965, the earthquake parameters were refined, and a focal mechanism was constructed.

Another interesting example of induced strong earthquake is seismic event on July 23, 2025 ($m_{pv} = 5.6$, $K_p = 12.9$) in Abay Region, Eastern Kazakhstan. The earthquake was felt in many populated areas of Kazakhstan and Russia. Analysis showed that it was most likely induced by excess precipitation that accumulated in the Bylkyldak River bed, which had been disturbed by alluvial gold mining.

ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ СТРУКТУРЫ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ S-ВОЛН В РАЙОНЕ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ: ВОЗМОЖНАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ С ВАРИАЦИЯМИ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И СИЛЬНЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ

И. Н. Соколова^{1,*}, Ю. Ф. Копничев², Г. Я. Хачикян³

¹Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Обнинск, Россия

²Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

³Национальный научный Центр сейсмологических наблюдений и исследований МЧС РК, Аль-Фараби, Казахстан

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

В докладе приведены результаты исследования пространственно-временных вариаций поля поглощения поперечных S волн в литосфере Северного Тянь-Шаня (хребет Заилийский Алатау).

Показано, что в области Заилийского разлома наблюдаются существенные временные вариации поля поглощения в средней и нижней коре. По данным двух станций Талгар (TLG) и Медео (MDO), расположенных вблизи г. Алматы, изучены вариации добротности среды Q_s за период 1985–2025 гг. Такие вариации наиболее надежно выделяются по записям взрывов на небольших по площади карьерах, для которых можно исключить из рассмотрения пространственные неоднородности поля поглощения. Для анализа были выбраны сейсмограммы взрывов, произведенные на карьере Котур-Булак, зарегистрированные станциями MDO и TLG; существенно, что для обеих станций, трассы пересекали Заилийский разлом.

По станции MDO исследованы вариации эффективной добротности в интервале времени $t = 10$ –25 с, который соответствует диапазону глубин ~ 18 –44 км. В течение периодов 1985–1986 и 2002–2016 гг. в указанном диапазоне глубин поглощение было достаточно слабым ($Q_s \sim 2000$). В то же время в 1989–1996 гг. поглощение резко выросло (параметр Q_s варьировался в диапазоне 60–160). Некоторое уменьшение добротности ($Q_s \sim 300$) наблюдалось также в 2016–2017 гг.

По данным станции TLG в интервале времени $t = 10$ –22 с (глубины 18 $\sim$ 39 км) огибающим соответствуют существенные временные вариации параметра Q_s . В 1996–2005 гг. величины Q_s изменяются в диапазоне 250–2000, в то время как в 1990–1995 гг. – резко падают. Отметим, что в 1990–1995 гг. параметру Q_s соответствовали минимальные значения по записям обеих станций.

Существенно, что за последние 40 лет наиболее сильные землетрясения в районе Северного Тянь-Шаня произошли именно в этом промежутке времени: в 1990 (Байсорунское, $M = 6.4$) и 1992 гг. (Сусамырское, $M = 7.3$). Это позволяет предполагать, что в зонах крупных региональных разломов существуют особо чувствительные области, которые реагируют на изменения напряженного состояния участков земной коры, связанные с подготовкой сильных землетрясений, даже расположенных на значительном удалении от таких областей (в случае Сусамырского землетрясения – на расстояниях ~ 250 км). Данные о вариациях поля поглощения говорят о том, что сверхчувствительность таких областей обусловлена активной миграцией глубинных флюидов в средней и нижней коре, возможно, соединяющихся по зонам крупных разломов.

Обнаружено, что значения Q_s имеют тенденцию быть повышенными в годы низкой солнечной активности по сравнению с годами высокой солнечной активности, что может косвенно указывать на влияние вариаций солнечной активности на миграцию флюидов в земной коре изучаемого региона.

Сопоставление данных о поглощении с положением выделенных ранее сейсмогенерирующих зон показывает, что в целом высокое поглощение соответствует Заилийской и Кеминской зонам. Вместе с тем, выделены наиболее опасные участки этих зон, в которых наблюдаются самые низкие величины эффективной добротности. В первую очередь к ним относится область к юго-востоку от станции MDO. Еще одна такая область находится к юго-западу от станции MDO.

TEMPORAL VARIATIONS OF S WAVE ATTENUATION FIELD STRUCTURE IN THE NORTHERN TIEN SHAN REGION: POSSIBLE CORRELATION WITH SOLAR ACTIVITY AND LARGE EARTHQUAKES

I. N. Sokolova^{1,*}, Y. F. Kopnichev², G. Y. Khachikyan³

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

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

³*National Scientific Center for Seismological Observations and Research MES RK, Al-Farabi, Kazakhstan*

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

We consider investigation results of spatio-temporal variations of S wave attenuation field in the lithosphere of the North Tien-Shan (Zailiysky Alatau ridge).

It was shown that essential temporal variations of the attenuation field are observed in the middle and lower crust. We studied variations of Q_s value for the period of 1985–2025 using data of stations TLG and MDO, situated near Almaty city. We have been analyzing recordings of explosions, conducted at the Kotur-Bulak quarry. It is essential, that lines cross large Zaili deep fault zone for the both stations.

We studied variations of Q_s values in the middle and lower crust using coda wave envelopes at frequency of ~ 1 Hz. Note, that the lowest Q_s values (~ 60 – 100) are observed in 1990–1995 for the both stations. It is important that the largest earthquakes in the North Tien Shan region for the last 40 years occurred in this time interval: Baisorun one (1990, $M_w = 6.4$) and Suusamyr one (1992, $M_w = 7.3$). It's possible to suggest that especially sensitive areas exist within zones of large regional faults. These areas can react on changes of the stress conditions within the crust sections, connected with large earthquake preparation, even located at considerable distances from such areas. (In the case of the Suusamyr earthquake, such distances were about 250 km). The data on the attenuation field variations suggest that supersensitivity of such areas can be explained by active migration of deep-seated fluids in the middle and lower crust, which makes easier due to existence of large deep fault zones.

We found that a tendency of Q_s growth in the years of the low solar activity exists in comparison with the years of high solar activity. This can testify to influence of solar activity variations on fluid migration in the earth's crust of the region under investigation.

A comparison of the attenuation data with the location of the seismic activity zones shows that, as a whole, high attenuation corresponds to Zaili and Kemin zones. We found the most dangerous strips of these zones, where the lowest values of effective Q_s values are observed. First of all, such areas are located to the south-west and south-east of station MDO.

АКТИВИЗАЦИИ И РАЗВИТИЕ РАЗЛОМА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ

Ю. П. Стефанов*, Р. А. Бакеев, А. А. Дучков

¹*Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия*

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

Вопросы об условиях активизации и особенностях развития разломов и трещин в геосреде представляют чрезвычайный интерес в связи с природными тектоническими процессами и добычей полезных ископаемых, обеспечением безопасности. В последние годы большой интерес вызывают проблемы, связанные с закачкой флюида при разработке углеводородов, а также с целью утилизации углекислого газа. Здесь важнейшее значение имеет возможность не только прогнозирования, но и выявления областей критического состояния, определение местоположения и ориентации разломов, а также активных трещин разных масштабов. Это осуществляется с помощью сейсмического мониторинга и обработки полученных сигналов.

В докладе представлены результаты численного исследования активизации и распространения разломов в результате изменения порового давления, а также сопутствующие явления излучения упругих волн. Для этого численно решается связанная задача поро-упругопластичности в двумерной постановке. Рассмотрено влияние ориентации, прочностных свойств и проницаемости на место активизации и распространение разлома.

Показано, что скорость распространения, а также величина смещения стенок и протяженность разрыва зависят от изменения прочностных свойств в ходе развития необратимой деформации. На характер развития процесса существенное значение имеет знак изменения порового давления. Повышение порового давления инициирует дилатансионный характер необратимой деформации, в то время как его понижение может привести к уплотнению пористой среды в разломной зоне. Возможно развитие смешанных режимов развития необратимой деформации. Реализация этих процессов определяется состоянием среды в зоне разлома и внешней нагрузкой.

ACTIVATION AND DEVELOPMENT OF A FAULT WITH CHANGES IN PORE PRESSURE

Yu. P. Stefanov*, R. A. Bakeev, A. A. Duchkov

Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

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

Questions about the activation conditions and development characteristics of faults and fractures in the geological environment are of great interest in relation to natural tectonic processes, mineral extraction, and safety. In recent years, issues related to fluid injection during hydrocarbon development, as well as carbon dioxide utilization, have attracted considerable attention. Here, the ability to not only predict but also identify critical zones, determine the location and orientation of faults, and identify active fractures of various sizes, is crucial. This is accomplished through seismic monitoring and processing of the resulting signals.

This paper presents the results of a numerical study of fault activation and propagation as a result of changes in pore pressure, as well as the associated elastic wave emission phenomena. A coupled pore-elastoplasticity problem is numerically solved in a two-dimensional formulation. The influence of orientation, strength properties, and permeability on the activation location and fault propagation is examined.

It has been shown that the propagation velocity, as well as the magnitude of wall displacement and the extent of the rupture, depend on changes in strength properties during the development of irreversible deformation. The sign of the change in pore pressure has a significant impact on the nature of the process. An increase in pore pressure initiates dilatancy-type irreversible deformation, while a decrease in pore pressure can lead to compaction of the porous medium in the fault zone. Mixed regimes of irreversible deformation may develop. The occurrence of these processes is determined by the state of the medium in the fault zone and the external load.

**ВАРИАЦИИ ВЕРТИКАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ ЭЛЕКТРОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ПОЛЯ
И СЕЙСМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ЮЖНОЙ ЧАСТИ САХАЛИНА В 2024-2026 гг.**

**Н. С. Стовбун^{1,*}, Л. М. Богомолов¹, А. С. Закупин,¹ И. П. Дудченко¹,
С. А. Гуляков¹, Д. В. Костылев^{1,2}**

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

²Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск, Россия

*E-mail: nikolay19972016@gmail.com

В работе исследуются вариации вертикальной компоненты электротеллурического поля (ЭТП) до и после землетрясений, произошедших в период 2024–2026 гг. Анализировались данные с двух станций, расположенных на юге о. Сахалин в центральной («Южно-Сахалинск») и западной («Колхозное») частях. На станции «Южно-Сахалинск» на глубине около 2 м были установлены две системы электродов, расположенные на расстоянии 10 м друг от друга. Каждая система (по сути, первичный преобразователь) состоит из трех пластин размером 50 × 50 см, расположенных друг под другом на расстоянии 50 см. Измерительный пункт в западной части о. Сахалин (станция «Колхозное») имеет идентичную методику измерений. Отличием является то, что в 5 метрах от каждой системы металлических пластин дополнительно были установлены две системы электродов, где вместо пластин были использованы свинцовые цилиндры высотой 3.5 и диаметром 4.5 см.

Цель исследования – проверка гипотезы о возможном использовании вариаций вертикальной компоненты ЭТП как одного из предвестников землетрясения. Конкретной задачей данной работы является исследование вариаций вертикальной компоненты ЭТП на двух станциях в южной части о. Сахалин и анализ взаимосвязи с локальной сейсмичностью.

По результатам измерений ЭТП установлено наличие периодов с повышенным уровнем напряженности вертикального поля, не связанные с сезонностью. Сейсмические события с магнитудами $M > 2$, зарегистрированные на юге о. Сахалин, происходят преимущественно в эти периоды. Статистическая значимость этого результата о взаимосвязи увеличения напряженности вертикального ЭТП с изменением сейсмической активности подтверждена точным критерием Фишера на доверительном уровне 95%. Зависимости напряженности вертикального поля на станции «Колхозное» согласуются с данными со станции «Южно-Сахалинск» по части приуроченности активизации сейсмических событий в ближней зоне радиусом 50 км вокруг каждой станции в периоды с возросшей E_z . Сравнение записей E_z на двух станциях показало синхронизированные вариации, с временным сдвигом в 2 месяца (станция «Колхозное» опережает «Южно-Сахалинск»), что может отражать субрегиональные особенности сейсмического (геодеформационного) процесса. Анализ различия в сигналах ЭТП со стальных пластин и свинцовых электродов (коэффициент корреляции Пирсона 0.78) подчеркивают, что конструкция и материал датчиков отражается на форме записей, тем не менее оба типа датчиков пригодны для регистрации изменений вертикальной компоненты ЭТП.

VARIATIONS IN THE VERTICAL COMPONENT OF THE ELECTROTELLURIC FIELD AND SEISMIC ACTIVITY IN THE SOUTHERN PART OF SAKHALIN ISLAND IN 2024–2026

N. S. Stovbun^{1,*}, L. M. Bogomolov¹, A. S. Zakupin¹, I. P. Dudchenko¹, S. A. Gulyakov¹, D. V. Kostylev^{1,2}

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

²*Sakhalin Branch of the Federal Research Center —Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia*

*E-mail: nikolay19972016@gmail.com

The study examines variations in the vertical component of the electrotelluric field (ETF) before and after earthquakes that occurred in the period 2024–2026. Data from two stations located in the southern part of Sakhalin Island in the central («Yuzhno-Sakhalinsk») and western («Kolkhoznoe») sectors –were analyzed. At the «Yuzhno-Sakhalinsk» station, two electrode systems were installed at a depth of approximately 2 m, positioned 10 m apart. Each system (the sensor) consists of three plates with size of 50 × 50 cm, arranged one beneath the other with 50 cm intervals. The measurement point in the western part of Sakhalin Island (the «Kolkhoznoe» station) employs an identical measurement methodology. The distinction is that, 5 m from each system of metal plates, two additional electrode systems were installed in which lead cylinders 3.5 cm in height and 4.5 cm in diameter were used instead of plates. The aim of the study is to test the hypothesis that variations in the vertical component of the ETF may be used as one of the earthquake precursor. The specific objective of this work is to investigate variations in the vertical component of the ETF at the two stations in the southern part of Sakhalin Island and to analyze their relation with local seismicity.

The analyze of the ETF data showed existence of periods with an elevated level of vertical-field strength that are unrelated to seasonality. Seismic events with magnitudes $M \geq 2$ recorded in southern Sakhalin occur predominantly during these periods. The statistical significance of the observed relation between the increase in vertical ETF strength and changes in seismic activity was confirmed by Fisher's exact test at the 95 % confidence level. The variations of vertical-field strength at the «Kolkhoznoe» station are consistent with the data from the «Yuzhno-Sakhalinsk» station with respect to the timing of seismic-event activation within the near zone (a 50 km radius around each station) during periods of increased E_z . Comparison of the E_z records from the two stations revealed synchronized variations with a time lag of 2 months (the «Kolkhoznoe» station leads «Yuzhno-Sakhalinsk»), which may reflect subregional features of the seismic (geodeformational) process. Analysis of the differences in ETF signals obtained from steel plates and lead electrodes (Pearson correlation coefficient 0.78) demonstrates that sensor design and material are reflected in the shape of the records; nevertheless, both types of sensors are suitable for registering changes in the vertical component of the ETF.

**ВРЕМЕННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ БЕНЬОФФА В
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОКРЕСТНОСТИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЕВРАЗИИ**

В. Н. Сычев^{1,*}, Л. М. Богомолов¹, М. В. Родкин^{1,2}

¹*Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Южно-Сахалинск, Россия*

²*Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук, Москва, Россия*

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

Изменение напряжений и деформаций в земной коре чаще всего приводит к ее реакции в виде землетрясения. Деформационные процессы, протекающие до и после землетрясения традиционно рассматриваются по их отражению в виде количества событий в единицу времени, которое принимают как сейсмическую активность. Форшоковая и афтершоковая активности описываются эмпирическими прямым и обратным законами Омори–Утсу. Рост форшоковой активности эмпирически зачастую пытаются аппроксимировать различного вида возрастающими функциями, которые далее используются для оценок времени сильного землетрясения. Например, предложена модель с построением кинетического уравнения для активности на основе эмпирических последовательностей землетрясений (модель саморазвивающихся процессов, СРП [1]). Эта модель описывает лавинообразное нарастание сейсмической активности на интервале времени непосредственно перед возникновением сильного землетрясения, а также снижение активности при возвращении в состояние покоя.

Интересные результаты продемонстрировали исследования обобщенной окрестности сильного землетрясения (ООСЗ) [2]. Было убедительно показано, что сходство прямого и обратного законов Омори–Утсу 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.

В зарубежных исследованиях предпринимались попытки использовать накопление деформаций Беньоффа для оценок времени до главного события. В данной работе предлагается описать процесс высвобождения сейсмической энергии при форшоках и афтершоках, отраженный в деформациях Беньоффа, с помощью инстантонной модели. Кратко о выборе модели. Инстантон – это решение уравнений, описывающих резкие изменения во времени параметров состояния системы, которое существует только в ограниченное время. В случае уравнения движения инстантон – просто разновидность солитонов. Такие решения получаются в контексте взаимодействий, когда классическая динамика системы в определенные моменты времени может демонстрировать аномальные, мгновенные переходы, например, переходы через энергетические барьеры. Для появления решений инстантонов принципиальным является наличие нелинейности в определяющих уравнениях (в частности, уравнении движения).

Для исследования выбраны сильные землетрясения в различных регионах Евразии: Камчатка, Сахалин, Турция, Япония. Для этих землетрясений построены зависимости суточных приращений деформаций Беньоффа и их возможные аппроксимации инстантонными решениями модельных кинетических уравнений. Показана возможность подбора параметров, для которых достигается приемлемое соответствие эмпирических и теоретических зависимостей в интервале плюс-минус одна неделя от главного события. Этот результат дополняет материалы, представленные на предыдущей конференции «Триггерные эффекты в геосистемах» о возможности применения инстантонной модели для описания активности форшоков и афтершоков [3].

Литература

1. Мальшев А.И., Тихонов И.Н. Нелинейные закономерности развития сейсмического процесса во времени // Физика земли. 2007. № 6. С. 37–51.

2. Родкин М.В. Сейсмический режим в обобщенной окрестности сильного землетрясения // Вулканология и сейсмология. 2008. № 6. С. 1–12.

3. Богомолов Л.М., Родкин М.В., Сычев В.Н. Инстантонное представление форшок-афтершоковых последовательностей. // Физика Земли. 2025. № 2. С. 43–57.

TEMPORAL DEPENDENCIES OF BENIOFF STRAIN RATE IN SPACE-TIME VICINITY OF STRONG EARTHQUAKES IN EURASIA

V. N. Sychev^{1,*}, L. M. Bogomolov¹, M. V. Rodkin^{1,2}

¹*Institute of marine geology and geophysics, Far Eastern Branch of the Russian academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia*

²*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of Russian academy of sciences, Moscow, Russia*

* E-mail: koitash@mail.ru

Changes in stress-strained state in the Earth's crust most often lead to its reaction as an earthquake. Straining processes occurring before and after an earthquake are traditionally considered by their signatures, as the number of events per time unit (seismic activity). Foreshocks and aftershocks activity is described by the empirical direct and inverse Omori–Utsu laws. The growth of foreshocks is to be approximated by various increasing functions, to estimate thereafter the time of a strong earthquake. For example, a model of self-developing processes is proposed in the form of kinetic equation for activity with solution adjusting with empirical earthquake sequences. This model describes an avalanche-like increase in seismic activity just before the mainshock occurrence.

Interesting results have been demonstrated by studies of the generalized vicinity of large earthquakes (GVLE). It has been convincingly shown that the similarity of the direct and inverse Omori–Utsu laws also applies to anomalies in the slope of the recurrence plot (average earthquake magnitude) and to a number of other characteristics of the activation process. At the same time, all the anomalies detected in the GVLE allow for a well-defined quantitative parameterization. Naturally, the values of the parameters of the corresponding regression ratios and averaged characteristics like foreshocks to aftershocks number ratio vary in different cases.

In foreign studies, they made attempts to use Benioff strains accumulation to estimate the time of the mainshock. In this paper, an instanton model is proposed to describe the process of seismic energy release (the foreshocks and aftershocks) represented as Benioff strains. Briefly about a model selected. An instanton is a solution of equations describing abrupt changes in time in system state parameters, existing only for a limited time. Particularly, for equation of motion an instanton is just a kind of soliton. Such solutions are obtained in the context of interactions, when the classical dynamics of a system at certain points in time may exhibit anomalous, instantaneous transitions, for example, transitions through energy barriers. The nonlinearity in the constitutive equations is fundamental for the appearance of instanton solutions.

Strong earthquakes in various regions of Eurasia were selected for the study: Kamchatka, Sakhalin, Turkey, and Japan. The dependences of daily increments of Benioff strains and their possible approximations by instanton solutions of model kinetic equations are constructed for these earthquakes. The best parameters selection is shown to achieve acceptable correspondence of empirical and theoretical dependencies in the range of plus or minus one week from the mainshock. This result complements the materials presented at the previous conference «Trigger Effects in Geosystems» about use of instantons to describe foreshocks and aftershocks activity.

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СБРОСА НАПРЯЖЕНИЙ

Н. А. Сычева*

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

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

Горный Крым, как и Северный Кавказ, входит в число наиболее тектонически активных регионов России. Эти регионы находятся в зоне сочленения Скифской плиты и Альпийско-Гималайского складчатого пояса, их геодинамика в широком смысле обусловлена взаимодействием двух крупных литосферных плит – Евразийской и Аравийской. Геодинамические особенности региона Северного Кавказа обусловлены динамикой Кавказского горного сооружения и активностью Эльбрусского вулканического центра, а Крыма – динамикой системы «континентальная окраина (Горный Крым) – субокеаническая впадина (Черное море)». Крым, как и Северный Кавказ, характеризуется повышенной тектонической активностью, интенсивными современными движениями земной коры, высокой сейсмичностью и вулканизмом [1].

Для сложного и неоднородного в сейсмотектоническом плане Крымско-Черноморского региона ежегодное пополнение банка данных о параметрах (динамических и кинематических) очагов местных землетрясений является крайне актуальной задачей. Это необходимо в целях изучения и общего познания геодинамических процессов, протекающих в глубинной среде, где зарождаются очаги землетрясений, и возможного прогноза параметров сильных сейсмических воздействий на поверхности Земли [2].

Из опубликованных источников для Крымско-Черноморского региона собраны сведения о динамических параметрах (ДП) 261 землетрясения с КП = 5.2–13.1 (КП – класс землетрясения по Пустовитенко и Кульчицкому), которые произошли с 1990 по 2022 гг.: скалярный сейсмический момент M_0 , радиус очага r , сброс касательных напряжений τ_{xy} и др. Построены распределения ДП в зависимости от магнитуды и скалярного сейсмического момента, выполнена аппроксимация распределений ДП линейной функцией, в некоторых случаях дополнительно рассматривалась степенная. Рассчитан коэффициент детерминации R^2 . Для Крымско-Черноморского региона зависимость логарифма скалярного сейсмического момента имеет вид: $\lg(M_0) = 0.87M + 11.4$ ($R^2 = 0.84$). На основе каталога землетрясений (1993–2022 гг.) построено площадное распределение среднегодовой скорости сейсмотектонических деформаций (интенсивность СТД). Проведено сравнение интенсивности СТД с уровнем сброшенных напряжений. По данным о сброшенных касательных напряжениях для Крымско-Черноморского региона построено площадное распределение средневзвешенного значения сброшенных напряжений [3].

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН (FMWU-2025-0036).

Литература

1. Миронов А.П., Милуков В.К., Стеблов Г.М. Современные подвижки северного Кавказа и Крыма по GPS наблюдениям. В кн.: Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы докладов всероссийской конференции. 2016. Т. 1. С. 168–170.
2. Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э., Бондарь М.Н. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма 2022 года. Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского // География. Геология. 2023. Vol. 9 (4). P. 139–156.
3. Sycheva N.A., Bogomolov L.M. Distribution of Reduced Seismic Energy and Stress Drop in the Altai-Sayan Seismoactive Region // Geodynamics & Tectonophysics. 2025. Vol. 16 (4). P. 0835. <https://doi.org/10.5800/GT-2025-16-4-0835>

SOURCE PARAMETERS OF EARTHQUAKES IN THE CRIMEAN-BLACK SEA REGION. STRESS DROP DISTRIBUTION

N. A. Sycheva*

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian academy of Sciences, Moscow, Russia

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

Mountainous Crimea, like the North Caucasus, is among the most tectonically active regions of Russia. These regions are located in the junction zone of the Scythian Plate and the Alpine-Himalayan fold belt; their geodynamics are broadly determined by the interaction of two major lithospheric plates – the Eurasian and Arabian. The geodynamic features of the North Caucasus region are determined by the dynamics of the Caucasus mountain system and the activity of the Elbrus volcanic center, while those of Crimea are determined by the dynamics of the «continental margin (Mountainous Crimea) – suboceanic basin (Black Sea)» system. Crimea, like the North Caucasus, is characterized by increased tectonic activity, intense modern crustal movements, high seismicity, and volcanism.

For the complex and seismotectonically heterogeneous Crimean-Black Sea region, annual replenishment of the database on the parameters (source and kinematic) of local earthquake foci is a highly pressing task. This is necessary for the study and general understanding of geodynamic processes occurring in the deep environment where earthquake source originate, and for the possible prediction of the parameters of strong seismic impacts on the Earth's surface.

The information on the dynamic parameters (DP) of 261 earthquakes with $KP = 5.2–13.1$ (KP , earthquake class according to Pustovitenko and Kulchitsky) that occurred from 1990 to 2022 was collected for the Crimean-Black Sea region from various sources. These parameters include scalar seismic moment of M_0 , source radius r , stress drop τ_{xy} , etc. The distributions of the DP depending on the magnitude and scalar seismic moment were constructed and approximated by a linear function; in some cases, a power function was additionally considered. The determination coefficient R^2 was calculated. The dependence of the logarithm of the scalar seismic moment for the Crimean-Black Sea region is $\lg(M_0) = 0.87M + 11.4$ ($R^2 = 0.84$). The areal distribution of the average annual rate of seismotectonic deformations (STD intensity) was constructed based on the earthquake catalog (1993–2022). The STD intensity was compared with the stress drop level. Based on the data on the stress drop for the Crimean-Black Sea region, the areal distribution of the weighted average of the stress drop was constructed.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА В ПЕСЧАНОМ СЛОЕ

А. А. Таирова*, Н. А. Юдошкин, Г. В. Беляков

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: moscouposte@gmail.com*

В работе представлено экспериментальное исследование в гранулированной пористой среде фильтрации газа, моделирующей грязевой вулкан, являющийся, как считается, показателем изменений полей напряжений в результате региональных геодинамических процессов. Опыты проводились на оптически прозрачной ячейке Хеле-Шоу, позволяющей визуализировать процессы течения газа в слое песчаных частиц и фиксировать картину происходящего в режиме реального времени. Предложена двумерная модель возникновения и развития грязевого вулкана, расположенного в разломной зоне, заполненной раздробленной и обломочной породой. Рассмотрены этапы формирования и роста зоны разуплотнения песчаного слоя в ходе фильтрации газа сквозь него. Возникновение разуплотнения возникает на дневной поверхности и затем, с некоторой цикличностью движется к источнику, находящемуся на глубине. В случае сильного потока газа в песке на малой глубине заложения источника возникает устойчивый канал, по которому происходит течение газа и сброс давления, таким образом, разгружая поля напряжений осадочной породы. При тех же потоках, но при больших глубинах, устойчивого канала не возникает. Газ, профильтровавшись через песчаный массив, и достигнув дневной поверхности, образует неустойчивость в виде бугорка из песчинок, при этом в толще массива локально возникают неустойчивые зоны разуплотнения, содержащие свободный объем, в которых происходит небольшое перемещение частиц. В работе выявлены условия возникновения каналов и зон разуплотнения песчаного слоя в зависимости от давления газа и глубины заложения его источника, а также скорости их развития.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012100531-7).

EXPERIMENTAL MODELING OF GAS FILTRATION IN A SAND LAYER

A. A. Tairova*, N. A. Yudochkin, G. V. Belyakov

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

**E-mail: moscouposte@gmail.com*

This paper presents an experimental study of gas percolation in a granular porous medium, simulating a mud volcano, which is believed to be an indicator of stress field changes resulting from regional geodynamic processes. Experiments were conducted using an optically transparent Hele-Shaw cell, which allows for the visualization of gas flow in a layer of sand particles and the recording of events in real time. A two-dimensional model is proposed for the origin and development of a mud volcano located in a fault zone filled with crushed and clastic rock. The stages of formation and growth of a decompression zone in the sand layer during gas percolation are examined. Decompression occurs at the surface and then, with some cyclicity, moves toward the source located at depth. In the case of a strong gas flow in the sand, a stable channel is formed at the shallow source depth, through which gas flows and pressure is released, thereby relieving the stress fields of the sedimentary rock. With the same flows, but at greater depths, a stable channel does not develop. Gas, having filtered through the sand mass and reaching the surface, forms an instability in the form of a mound of sand grains. At the same time, unstable zones of decompression, containing free volume and slight particle movement, develop locally within the massif. This study identified the conditions for the formation of channels and decompression zones in the sand layer depending on gas pressure and the depth of its source, as well as the rate of their development.

ТРИ КЛАССА ЗАПРЕДЕЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ ЦЕЛЬНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ РАЗЛИЧНЫЕ ФОРМЫ СПОНТАННОГО РАЗРУШЕНИЯ НА РАЗНЫХ ГЛУБИНАХ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Б. Г. Тарасов*

Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела, Санкт-Петербург, Россия

**E-mail: bgtaras@gmail.com*

Сегодня механизм землетрясений в земной коре, в основном, понимается как периодическое проскальзывание по существующим разломам (стик-слип). Данный подход поддерживается таким сочетанием общих свойств землетрясений, как: активизация на базе существующих разломов, низкий уровень сдвиговых напряжений в зоне землетрясений, малый сброс напряжений и повторяющаяся активность. Лабораторное моделирование этих процессов осуществляется на образцах, включающих разлом. Интерес же к изучению свойств цельных прочных пород при напряженных состояниях, соответствующих сейсмогенным глубинам земной коры, был потерян 60 лет назад после единодушного принятия стик-слип идеи. Однако, обсуждаемые в данном докладе экстраординарные запредельные свойства цельных прочных пород, обнаруженные при боковых давлениях, отражающих сейсмогенные глубины, позволяют сделать вывод, что все упомянутые общие свойства землетрясений могут вызываться не только стик-слип процессами, но и спонтанным разрушением цельных пород.

В докладе показано, что с ростом бокового давления модуль запредельного деформирования прочных пород меняется в следующем порядке: класс I, характеризующийся отрицательным модулем и устойчивым разрушением при жестком нагружении, меняется на класс II, характеризующийся положительным модулем и спонтанным самоподдерживающимся разрушением даже в условиях абсолютно жесткого нагружения, и далее переходит в экстремальный класс II, характеризующийся равенством между модулем спада и модулем упругой разгрузки, что вызывает взрывоподобное спонтанное разрушение практически без поглощения энергии.

На базе этих исследований предложена универсальная шкала хрупкости горных пород при сжатии, которая отражает запредельные свойства пород от абсолютной (квази) пластичности до абсолютной хрупкости, соответствующей экстремальному классу II. Критерий хрупкости определяется из баланса энергии запредельного разрушения. Было установлено также, что при высоких боковых давлениях, соответствующих сейсмогенным глубинам, наряду с экстремальной хрупкостью порода приобретает способность разрушаться при очень низком уровне сдвиговых напряжений, который может быть на порядок ниже фрикционной прочности. Такая форма разрушения классифицируется как класс III.

Эти аномальные свойства пород не были ранее обнаружены из-за конструктивного несовершенства всех существующих жестких и сервоконтролируемых машин, на которых процесс разрушения прочных пород при сейсмогенных давлениях происходит во взрывоподобном режиме с невозможностью фиксировать истинные запредельные свойства. Специальная машина, сконструированная автором, позволила заглянуть в «запретную» зону запредельного разрушения.

Для объяснения обнаруженных феноменальных свойств прочных горных пород был разработан новый (ранее неизвестный) механизм разрушения. Он получил название веерного механизма по форме структуры головной части сдвиговой трещины, разрушающей горную породу при больших боковых давлениях. Веерная структура является природным механизмом, который снижает почти до нуля трение в голове трещины и усиливает в десятки раз действующие сдвиговые напряжения. Совокупность этих свойств создает условия для спонтанного роста сдвиговых трещин с высокими скоростями (вплоть до сверхсдвиговых) в цельных породах при низких сдвиговых напряжениях. Однако, для зарождения веерной структуры необходимы высокие локальные напряжения, которые образуются вблизи различных дефектов в земной коре (трещин, разломов, выработок). Создание нового динамического разлома, вызывающего землетрясение, вблизи старого разлома может интерпретироваться как активизация старого разлома. Для широкомасштабного изучения аномальных свойств прочных пород при высоких боковых давлениях и феноменальных возможностей веерного механизма необходимо создание испытательных машин нового поколения.

THREE CLASSES OF POST-PEAK BEHAVIOR OF HARD ROCKS THAT DETERMINE DIFFERENT FORMS OF SPONTANEOUS FAILURE AT DIFFERENT DEPTHS OF THE EARTH'S CRUST

B. G. Tarasov*

Rock Mechanics and Surveying Research Institute, St. Petersburg, Russia

**E-mail: bgtaras@gmail.com*

Today, the mechanism of earthquakes in the Earth's crust is primarily understood as periodic slippage along existing faults (stick-slip). This approach is supported by a combination of common earthquake properties: activation along existing faults, low shear stresses in earthquake zones, low stress drop, and repetitive activity. Laboratory modeling of these processes is performed on specimens containing a fault. Interest in studying the properties of intact strong rocks under stress conditions corresponding to seismogenic depths in the Earth's crust was lost 60 years ago after the unanimous acceptance of the stick-slip idea. However, this report discusses the extraordinary post-peak properties of intact strong rocks, discovered under confining pressures reflecting seismogenic depths, that allow us to conclude that all of the aforementioned common earthquake properties can be caused not only by stick-slip processes but also by spontaneous failure of intact rocks.

The report shows that with increasing confining pressure, the post-peak modulus of strong rocks changes in the following order: class I, characterized by a negative modulus and stable failure under stiff loading, changes to class II, characterized by a positive modulus and spontaneous self-sustaining failure even under absolutely stiff loading, and then passes to extreme class II, characterized by equality between the post-peak modulus and the elastic unloading modulus, which causes explosive-like spontaneous failure with virtually no energy absorption.

Based on these studies, a universal scale of rock brittleness at compression was proposed. It reflects the post-peak properties of rocks, ranging from absolute (quasi-) plasticity to absolute brittleness, corresponding to extreme Class II. The brittleness criterion is determined from the energy balance of post-peak fracture. It was also established that under high confining pressures corresponding to seismogenic depths, along with extreme brittleness, the rock acquires the ability to fracture at very low shear stress levels, which can be an order of magnitude lower than the frictional strength. This type of fracture is classified as Class III.

For study of these anomalous rock properties a special testing machine was designed. To explain of such rock properties, a new rupture mechanism was developed (the fan-shaped mechanism). The key element of this mechanism is the fan-shaped structure of the head of shear ruptures failing of hard rock at high confining pressures. The fan-shaped structure reduces friction at the rupture head to almost zero and increases the applied shear stress tenfold. These properties, taken together, create conditions for the spontaneous growth of shear ruptures at high rates (up to supershear) in intact rocks under low shear stresses. This failure process is accompanied by release of abnormally large amount of elastic energy, creating an earthquake.

АНОМАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГРАФИКОВ ПОВТОРЯЕМОСТИ В ПЕРИОД ПРОВЕДЕНИЯ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Н. Т. Тарасов*, Н. В. Тарасова

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

*E-mail: tarasov@ifz.ru

Активизация сейсмичности после подземных ядерных взрывов (ПЯВ) и на расстояниях до сотен и тысяч километров от их эпицентров была обнаружена ещё 30–35 лет назад. Уже первые публикации показали, что они инициировали в коре сложные процессы, которые приводили к повышению сейсмической активности через 5–30 суток. При этом отмечалось перераспределение землетрясений по их энергиям. Длительность задержки и интенсивность активизации отличались в разных геологических структурах [2], а также зависели от вида напряженного состояния коры [3]. Похожие изменения сейсмичности происходят и после удаленных землетрясений, что было надежно обосновано в целом ряде работ [1], однако вопрос о влиянии ПЯВ все еще остается дискуссионным. Поэтому работа в этом направлении была нами продолжена.

Для анализа использовались данные о 1130-ти ПЯВ, произведенных на полигонах всех ядерных держав, опубликованные на сайте прототипа Международного центра данных, а также каталог глобальной сейсмичности NEIC. Из него отобрано 30697 землетрясений представительных магнитуд ($M_w \geq 5.5$), произошедших на Земле за последние 59 лет. Этот период был разбит на годовые интервалы. По землетрясениям, произошедшим в пределах каждого из них, определялись коэффициенты (a , b) графиков повторяемости землетрясений (закон Гутенберга–Рихтера): $\lg(N) = a - b \cdot M_w$. В этих же интервалах рассчитывались значения ежегодной средней энергии (E) ПЯВ, после чего было изучено изменение a , b и E в зависимости от времени.

В результате выявлено аномальное, статистически высоко значимое повышение угловых коэффициентов b с 1981 по 1993 гг. Следовательно, в этот период увеличивается доля слабых землетрясений и уменьшается доля сильных. Активизацию слабых землетрясений также подтверждает высоко значимое повышение в этот период сейсмической активности a , которую можно интерпретировать как логарифм числа землетрясений с $M_w = 0$. Анализ распределения магнитуд землетрясений во времени показал, что сильные землетрясения в этот период происходят реже, а их магнитуды статистически значимо уменьшаются. Интересно, что с 1981 по 1993 гг. землетрясения с магнитудой $M_w > 7.9$ исчезают вовсе. Сопоставление выявленных особенностей с изменениями во времени среднегодовой энергии E ПЯВ показало, что значения угловых коэффициентов b возросли почти сразу же после резкого (в 7–10 раз) повышения E , а после ее уменьшения до прежних значений величины b вернулись к уровню фона.

Угловой коэффициент b обычно интерпретируется как показатель неоднородности материала среды и/или приложенных касательных напряжений. Повышение его значений в период резкого увеличения среднегодовых значений энергии ПЯВ может свидетельствовать о повышении неоднородности массивов горных пород и приложенных касательных напряжений в сейсмоактивных областях Земли в это время.

Работа выполнена в рамках темы: «Мультидисциплинарные исследования разномасштабных пространственно-временных свойств сейсмического процесса и его неустойчивости для развития методов оценки и прогноза сейсмической опасности» (код FMWU-2025-0038).

Литература

1. Кочарян Г.Г. Дистанционное инициирование динамических событий. В кн.: Триггерные эффекты в геосистемах: материалы Всероссийского семинара-совещания. М.: ГЕОС. 2010. С. 18–30.
2. Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В. Влияние ядерных взрывов на сейсмический режим // Доклады РАН. 1995. Т. 343. № 4. С. 543–546.
3. Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В. Геодинамические последствия триггерного воздействия электромагнитных полей и взрывов на сейсмичность // Инженерная физика. 2019. № 8. С. 50–57.

ANOMALOUS CHANGES IN RECURRENCE DIAGRAMS PARAMETERS DURING NUCLEAR TESTS

N. T. Tarasov*, N. V. Tarasova

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: tarasov@ifz.ru*

Seismicity activation following underground nuclear explosions (UNEs) and at distances of hundreds and thousands of kilometers from their epicenters was discovered 30–35 years ago. The first publications showed that they initiated complex processes in the crust, leading to increased seismic activity 5–30 days later. A redistribution of earthquake energies was also observed. The delay time and intensity of seismic activity varied across different geological structures and also depended on the type of crustal stress state. Similar changes in seismicity also occur after distant earthquakes, which has been reliably substantiated in a number of studies, but the impact of UNEs remains controversial. Therefore, we continued our work in this area.

For this purpose, we used data on 1130 UNEs conducted at the test sites of all nuclear powers, published on the website of the Prototype International Data Center, as well as the NEIC Global Seismicity Catalog. From this catalog, we selected 30697 earthquakes of significant magnitude ($M_w \geq 5.5$) that occurred on Earth over the past 59 years. This period was divided into annual intervals. The coefficient (a , b) of earthquake recurrence diagrams (the Gutenberg-Richter law: $\lg(N) = a - b \cdot M_w$) were determined from the earthquakes that occurred within each of these intervals. The annual mean energy (E) of UNEs was calculated over these same intervals, after which the changes in a , b , and E over time were studied.

This revealed an anomalous, statistically significant increase in the angular coefficient b from 1981 to 1993. Consequently, during this period, the number of weak earthquakes increases and the amount of strong ones decreases. The increase in weak earthquakes is also confirmed by the highly significant increase in seismic activity a during this period, which can be interpreted as the logarithm of the number of earthquakes with $M_w = 0$. An analysis of the distribution of earthquake magnitudes over time revealed that strong earthquakes occur less frequently during this period, and their magnitudes decrease statistically significantly. Interestingly, from 1981 to 1993, earthquakes with a magnitude of $M_w > 7.9$ disappear entirely. A comparison of the identified features with temporal variations in the annual mean energy E of UNEs revealed that the values of the angular coefficient b increased almost immediately after a sharp (7–10-fold) increase in E , and after its decrease to previous values, the b values returned to background levels.

The angular coefficient b is usually interpreted as an indicator of the heterogeneity of the crust and/or applied shear stresses. An increase in its values during a period of sharp increases in the average annual energy of UNEs may indicate increased heterogeneity of rock masses and applied shear stresses in seismically active regions of the Earth at that time.

ВОПРОСЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ РАННЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Ц. А. Тубанов^{1,2*}, М. А. Хритова³

¹Бурятский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Улан-Удэ, Россия

²Геологический институт им. Н. Л. Добрецова Сибирского отделения Российской академии наук, Улан-Удэ, Россия

³Байкальский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Иркутск, Россия

*E-mail: ttsyren@gmail.com

Предсказуемость процесса роста разрыва при крупных землетрясениях и наличие у него наблюдаемых особенностей, отличающихся от более мелких событий, являются фундаментальными вопросами физики очага землетрясения, имеющими отношение к раннему предупреждению и прогнозированию [4]. Проблемы принятия решений, связанные с прогнозом землетрясений и смягчением сейсмической опасности, в настоящее время являются предметом значительных дискуссий, особенно, из-за ошибок вероятностной оценки сейсмической опасности после недавних разрушительных землетрясений [1, 3]. Как отмечено [5], из-за неопределенностей прогноза, его применимость должна оцениваться с учетом широкого диапазона возможных мер по смягчению последствий различного уровня, от повышенной готовности до эвакуации. Поскольку надёжное прогнозирование землетрясений в настоящее время невозможно, необходимо принять меры по защите крупных урбанизированных территорий от разрушений и потерь. По этой причине в последние два десятилетия появился новый подход к снижению краткосрочного риска, основанный на достижениях в области связи и автоматической обработки. Расширение и уплотнение региональных сейсмических сетей в сочетании с внедрением цифровых систем записи, телеметрии и обработки обеспечивает основу для быстрой информации о землетрясениях. Этот подход, который можно назвать сейсмологией в реальном времени, позволяет приступить к созданию системы раннего предупреждения о сильном землетрясении (СРПЗ). Технология включает сбор и анализ сейсмических данных сразу после первых секунд регистрации сейсмических колебаний, чтобы результаты могли эффективно использоваться сообществом по реагированию на чрезвычайные ситуации, а в некоторых случаях и для раннего предупреждения и оповещения [2].

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (темы №№ 126020216348-5, 075-00609-26) с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Литература

1. Шебакин П.Н., Гвишиани А.Д., Дзедобоев Б.А., Скоркина А.А. Почему необходимы новые подходы к оценке сейсмической опасности? // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 507. № 1. С. 91–97. <https://doi.org/10.31857/S2686739722601466>
2. Kanamori H. Real-time seismology and earthquake damage mitigation // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2005. Vol. 33. P. 195–214. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.33.092203.122626>
3. Kossobokov V.G., Nekrasova A.K. Global Seismic Hazard Assessment Program maps are erroneous // Seismic Instruments. 2012. Vol. 48. P. 162–170. <https://doi.org/10.3103/S0747923912020065>
4. Lu W., Ide S., Yue H. Feature of cascading rupture frequently observed in Northern California // Communications Earth and Environment. 2025. Vol. 6 (167). <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02138-y>
5. Peresan A., Kossobokov V.G., Panza G.F. Operational earthquake forecast/prediction // Rend. Fis. Acc. Lincei. 2012. Vol. 23. P. 131–138.

EARTHQUAKE EARLY WARNING SYSTEMS DEVELOPMENT. REVIEW

T. A. Tubanov^{1,2}, M. A. Khritova³

¹*Buryat Regional Seismological Centre of Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russia*

²*Dobretsov Geological Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russia*

³*Baikal Regional Seismological Centre of Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia*

**E-mail: ttsyren@gmail.com*

The predictability of rupture growth during large earthquakes and the presence of observable features that differ from those of smaller events are fundamental questions in earthquake source physics relevant to early warning and forecasting. Decision-making issues related to earthquake forecasting and seismic hazard mitigation are currently the subject of considerable debate, particularly due to errors in probabilistic seismic hazard assessment following recent destructive earthquakes. As noted by, due to forecast uncertainties, its applicability should be assessed taking into account a wide range of possible mitigation measures at various levels, from increased preparedness to evacuation. Since reliable earthquake forecasting is currently impossible, measures must be taken to protect large urban areas from damage and loss. For this reason, a new approach to short-term risk reduction has emerged in the past two decades, based on advances in communications and automated processing. The expansion and densification of regional seismic networks, coupled with the introduction of digital recording, telemetry, and processing systems, provides the basis for rapid earthquake information. This approach, which can be called real-time seismology, makes it possible to begin developing a large earthquake early warning system (LEWS). This technology involves collecting and analyzing seismic data immediately after the first seconds of seismic activity, so that the results can be effectively used by the emergency response community and, in some cases, for early warning and notification.

**ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВЫХ СПЕКТРОВ АФТЕРШОКОВ КУДАРИНСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ
(09.12.2020, $M_w = 5.5$) НА СРЕДНЕМ БАЙКАЛЕ**

Ц. А. Тубанов^{1,2,*}, А. А. Скоркина³, Д. П.-Д. Санжиева^{1,2}

¹Бурятский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Улан-Удэ, Россия

²Геологический институт им. Н.Л. Добрецова Сибирского отделения Российской академии наук, Улан-Удэ, Россия

³Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: ttsyren@gmail.com

Для оценок сейсмической опасности важно знать характеристики сейсмического воздействия в широком диапазоне частот, которые описываются характеристиками среды (региональная модель затухания) и очага (характерный очаговый спектр, длительность воздействий). Для апробации спектрального анализа по методике [2] были выбраны афтершоки одного из сильнейших землетрясений последних лет – Кударинского землетрясения ($M_w = 5.5$, 09.12.2020 г.), которое сопровождалось сотрясениями интенсивностью 6–7 баллов в эпицентральной области и 4–5-ти бальными сотрясениями в городах Иркутске и Улан-Удэ [3, 5]. Важной особенностью этого землетрясения являлась длительность колебаний: до 30–40 секунд, что не характерно для такого порядка магнитуд. Нами использовано более 250 записей 35 землетрясений (диапазон энергетических классов от 7 до 13.7) с 15 сейсмостанций, расположенных в центральной части Байкальского рифта. Для анализа отобраны данные с оптимальным отношением сигнал-шум (не менее 2.5 в диапазоне частот 0.4–25 Гц). Для приведения наблюдаемых спектров к очаговым использовалась частотно-зависимая модель затухания, полученная ранее [1]. Далее спектры аппроксимировались очаговой моделью Брюна [4]. Уникальностью анализируемой выборки является наличие источников, сконцентрированных близко в пространстве и времени, что предполагает получение идентичных очаговых спектров. Тем не менее, анализ показал, что (1) не все спектры описываются моделью с единственной частотой излома, а также (2) отмечен яркий пример анизотропного эффекта среды – а именно, мощное затухание сигнала в диапазоне частот 0.5–3 Гц для станций KYD, TIG, LST, предварительно связываемые с разломными структурами, расположенными на пути распространяющихся сейсмических волн.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (темы №№ 126020216348-5, 075-00609-26, 075-00608-26-00) с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Литература

1. Предеин П.А., Тубанов Ц.А. Оценка затухания сейсмических волн по огибающей коды в литосфере регионов с разным геодинамическим режимом на примере Тянь-Шаня и Байкальского рифта // Геодинамика и Тектонофизика. 2022. Т. 13. № 2. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0625>.
2. Скоркина А.А., Гусев А.А. Определение набора характерных частот очаговых спектров для субдукционных землетрясений Авачинского залива (Камчатка) // Геология и геофизика. 2017. Т. 58, № 7. С. 1057–1068. <https://doi.org/10.15372/GiG20170708>. EDN ZATHNZ.
3. Тубанов Ц.А., Санжиева Д.П.-Д., Кобелева Е.А., Предеин П.А., Цыдыпова Л.Р. Кударинское землетрясение 09.12.2020 г. ($M_w = 5.5$) на озере Байкал: результаты инструментальных и макросейсмических наблюдений // Вопросы инженерной сейсмологии. 2021. Т. 48. № 4. С. 32–47. <https://doi.org/10.21455/VIS2021.4-2> (RSCI)
4. Brune J.N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // Journal of Geophysical Research. 1970. Vol. 75 (26). P. 4997–5009. <https://doi.org/10.1029/jb075i026p04997>
5. Radziminovich Y.B., Lukhneva O.F., Novopashina A.V., Gileva N.A., Tubanov Ts.A., Tsydyypova L.R. The December 9, 2020, M_w 5.5 Kudara earthquake (Middle Baikal, Russia): internet questionnaire hard test and macroseismic data analysis // Bulletin of Earthquake Engineering. 2022. Vol. 20 (3). P. 1297–1324. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01305-8>

PARAMETERS OF FOCAL SPECTRA OF AFTERSHOCKS OF THE KUDARA EARTHQUAKE (DECEMBER 9, 2020, $M_w = 5.5$) IN THE MIDDLE BAIKAL REGION

T. A. Tubanov^{1,2,*}, A. A. Skorkina³, D. P.-D. Sanzhieva^{1,2}

¹*Buryat Regional Seismological Centre of Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russia*

²*Dobretsov Geological Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russia*

³*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of Russian academy of sciences, Moscow, Russia*

*E-mail: ttsyren@gmail.com

For seismic hazard assessments, it is important to know the characteristics of seismic impacts over a wide frequency range, which are described by the characteristics of the medium (regional attenuation model) and the source (characteristic focal spectrum, impact duration). To test the spectral analysis using the method of aftershocks of one of the strongest earthquakes in recent years were selected – the Kudarinsky earthquake ($M_w = 5.5$, December 9, 2020), which was accompanied by shaking of intensity 6–7 in the epicentral region and shaking of intensity 4–5 in the cities of Irkutsk and Ulan-Ude. An important feature of this earthquake was the duration of oscillations – up to 30–40 seconds, which is not typical for this magnitude. We used over 250 recordings of 35 earthquakes (with energy classes ranging from 7 to 13.7) from 15 seismic stations located in the central part of the Baikal Rift. Data with an optimal signal-to-noise ratio (at least 2.5 in the frequency range 0.4–25 Hz) were selected for analysis. A frequency-dependent attenuation model obtained previously was used to convert the observed spectra to focal spectra. The spectra were then approximated using the Brune focal model. A unique feature of the analyzed sample is the presence of sources concentrated close in space and time, which implies the acquisition of identical focal spectra. However, the analysis revealed that (1) not all spectra are described by a model with a single break frequency, and (2) a striking example of the anisotropic effect of the medium is noted – specifically, strong signal attenuation in the 0.5–3 Hz frequency range for the KYD, TIG, and LST stations, tentatively associated with fault structures located in the path of propagating seismic waves.

ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ МАКСИМАЛЬНОЙ МАГНИТУДЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, ИНДУЦИРОВАННЫХ ЗАКАЧКОЙ ЖИДКОСТИ

С. Б. Турунтаев^{1,*}, В. Ю. Рига^{1,2}, Н. А. Барышников¹

¹Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н. Л. Духова, Москва, Россия

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

По данным сайта <https://inducedearthquakes.org/> к настоящему времени уже насчитывается более 1370 случаев возникновения техногенных и триггерных землетрясений, из которых примерно 70% связаны с воздействием на флюидные системы в недрах. Случаи катастрофических землетрясений при этом редки и не всегда их триггерный характер является доказанным. К катастрофическим землетрясениям, вызванным закачкой жидкости, относятся, безусловно, землетрясение 15.11.2017 г. в Похане, Южная Корея (M_w 5,5, глубина очага 4.5 км), землетрясение с магнитудой M_w 5.6, произошедшее в начале сентября 2016 г. в штате Оклахома (США). Опасность техногенных землетрясений обусловлена, помимо прочего, тем, что очаги этих сейсмических событий располагаются в зоне ведения работ или на небольшом удалении от них и имеют, зачастую, небольшую глубину. Толчки даже небольшой интенсивности приводят к разрушениям зданий, построенных без применения мер повышенной сейсмостойкости, вызывают беспокойство населения. Крупнейшее в Европе газовое месторождение Гронинген (Нидерланды) было выведено из эксплуатации именно в связи с развитием техногенной сейсмичности. Имевшиеся оценки не предполагали появления землетрясений большой магнитуды, однако протесты населения вынудили прекратить разработку месторождения.

Ограничения, вводимые в ряде регионов мира на допустимые объемы воздействия на флюидные системы, сделали актуальной разработку научно обоснованных методов оценки связи магнитуд техногенных землетрясений с характеристиками воздействий. Исследованию механизмов развития индуцированной сейсмичности посвящено большое количество публикаций. Важным фактором является снижение эффективных нормальных напряжений на разломах при повышении порового давления, однако этого недостаточно: сейсмичность регистрируется и при относительно низких давлениях закачки. С. А. Шапиро с соавторами ввели параметр, названный сейсмогенным индексом, который связывает магнитуду индуцированных землетрясений с суммарным объемом закачки жидкости. Этот параметр применялся для разных регионов, но накапливающиеся данные не подтвердили наличие очевидной связи объемов закачки с магнитудами сейсмических событий. Другой метод оценки максимальной ожидаемой магнитуды техногенных землетрясений связан с поиском зависимости магнитуды землетрясений от скорости изменения порового давления, определяемой расходом закачиваемой жидкости.

В представленном докладе рассматриваются эти два способа оценки максимальных магнитуд землетрясений, индуцированных закачкой жидкости. Более детально представлена модель инициирования скольжения разлома закачкой жидкости, основанная на законе трения типа *rate-and-state*. Путем анализа результатов расчетов определены условия перехода асейсмических подвижек в сейсмогенерирующие, получены оценки магнитуд возможных сейсмических событий. Показано, что в рамках рассмотренной модели при росте скорости закачки происходит насыщение скорости скольжения и, соответственно, магнитуд возможных землетрясений, что может быть положено в основу оценки максимальных значений магнитуд индуцированных землетрясений.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012100531-7).

A POSSIBILITY TO ESTIMATE MAXIMAL MAGNITUDE OF INJECTION INDUCED EARTHQUAKES

S. B. Turuntaev^{1,*}, V. Y. Riga^{1,2}, N. A. Baryshnikov¹

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

²*Dukhov All-Russian Research Institute of Automatics, Moscow, Russia*

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

According to the website <https://inducedearthquakes.org/>, there have been over 1,370 cases of induced and triggered earthquakes to date, approximately 70% of which are associated with impacts on subsurface fluid systems. Catastrophic earthquakes are rare, and their trigger nature is not always proven. Fluid injection catastrophic earthquakes include, without a doubt, the November 15, 2017, earthquake in Pohang, South Korea (M_w 5.5, focal depth 4.5 km), and the M_w 5.6 earthquake that occurred in early September 2016 in Oklahoma, USA. The danger of man-made earthquakes is related, among other things, to the fact that the foci of these seismic events are located in the work zone or at a short distance from it and are often shallow. Even low-intensity tremors lead to the destruction of buildings constructed without seismic safety measures, causing public concern. Europe's largest gas field, Groningen, Netherlands, was decommissioned precisely due to the man-made seismicity. Existing assessments did not predict the occurrence of large-magnitude earthquakes, but public protests forced the cessation of field development.

Restrictions imposed in several regions of the world on permissible impacts on fluid systems have necessitated the development of scientifically grounded methods for assessing the relationship between man-made earthquake magnitudes and impact characteristics. Numerous publications have been devoted to the study of the mechanisms of induced seismicity. A key factor is the reduction in effective normal stresses on faults with increasing pore pressure, but this is insufficient seismicity is also recorded at relatively low injection pressures. S. Shapiro and co-authors introduced a parameter called the seismogenic index, which relates the magnitude of induced earthquakes to the total volume of fluid injected. This parameter was applied to various regions, but accumulating data did not confirm a clear relationship between injection volumes and seismic event magnitudes. Another method for estimating the maximum expected magnitude of man-made earthquakes involves finding the relationship between earthquake magnitude and the rate of pore pressure change, determined by the flow rate of injected fluid

This paper examines these two methods for estimating the maximum magnitude of earthquakes induced by fluid injection. A model for the initiation of fault slip by fluid injection, based on the rate-and-state friction law, is presented in more detail. By analyzing the numerical calculation results, the conditions for the transition from aseismic to seismogenic slip are determined and estimates of the magnitudes of potential seismic events are obtained. It is shown that within the framework of the considered model, with an increase in the injection rate, the sliding velocity and, accordingly, the magnitudes of possible earthquakes are saturated, which can be used as a basis for assessing the maximum values of the magnitudes of induced earthquakes.

**РЕАНАЛИЗ ДАННЫХ АКТИВНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ –
ШАГ НАЗАД ИЛИ ДВА ШАГА ВПЕРЕД?**

Е. М. Урвачев*

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

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

Исследования многих физических явлений, происходящих в ионосфере Земли, напрямую связаны с изучением таких объектов, как плазменные струи. Проведенные в 90-х годах XX века активные геофизические ракетные эксперименты «Флаккус» и «Северная звезда» представляли собой инъекцию в окружающую среду высокоскоростных струй алюминиевой плазмы, создававшихся взрывными генераторами плазменной струи, разработанными в Институте динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН.

Попытки объяснить полученные в ходе ракетных экспериментов данные с помощью существующих теорий о течении плазмы были сопряжены со значительными трудностями. Каждое из приближений можно было корректно применить лишь для описания конкретной стадии эксперимента. Целью настоящей работы являлось создание универсальной физико-математической модели и соответствующей методики численного моделирования, позволяющей решать фундаментальные задачи описания плазмодинамики активных экспериментов в ионосфере, включая анализ их связи с внешними воздействиями и глобальными процессами.

С помощью созданного инструментария удалось провести компьютерное моделирование всех ключевых стадий в едином расчете: от непосредственного процесса генерации и выпуска струи (за несколько десятков микросекунд) до разлета облака плазмы в магнитном поле (за доли секунды). Такой комплексный подход позволил впервые получить количественное совпадение между результатами моделирования и реальными показаниями датчиков концентраций ионов при выпуске одиночной струи алюминия на высоте 270 км (эксперимент «Северная звезда – II»). В эксперименте «Северная звезда – I» (на высоте 360 км) истечению алюминиевой плазмы предшествовал выпуск сжатого воздуха. Эта дополнительная стадия планировалась для создания более плотной окружающей среды, соответствующей более ранним опытам на высоте 140 км. В этом эксперименте наблюдались аномально высокие показания фотометров, более чем на порядок превышающие показания от одиночной струи. Созданная методика позволила однозначно связать столь высокий поток излучения с процессом взаимодействия плазмы с предварительно выпущенным воздухом.

Повышение энергии плазменной струи позволит проводить более длительные наблюдения и тщательнее исследовать процесс ее взаимодействия с геомагнитным полем. Этого можно добиться за счет слияния нескольких плазменных струй в одну, более мощную. Параметры образующегося при таком взаимодействии плазменного образования, которые демонстрируют перспективность такого сценария со множеством струй, были предсказаны с помощью разработанной методики. Другим перспективным направлением является планирование выпуска струи в экзосферу Земли (на высоте более 500 км). Активные эксперименты в условиях ближнего космоса в будущем могут открыть возможности для более тщательного изучения астрофизических процессов, чем на лабораторных установках на Земле.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012200655-9).

REANALYSIS OF ACTIVE GEOPHYSICAL EXPERIMENT DATA – A STEP BACK OR TWO STEPS FORWARD?

E. M. Urvachev*

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

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

Research into many physical phenomena occurring in the Earth's ionosphere is directly related to the study of objects such as plasma jets. The active geophysical rocket experiments «Fluxus» and «North Star» conducted in the 1990s involved the injection of high-velocity aluminum plasma jets into the surrounding environment. These jets were created by explosive-type generators developed at the Sadovsky Institute of geosphere dynamics of Russian academy of sciences.

Attempts to explain the data obtained during these rocket experiments using existing theories of plasma flow were fraught with significant difficulties. Each approximation could only be correctly applied to describe a specific stage of the experiment. The aim of the present work was to create a universal physical-mathematical model and a corresponding numerical simulation methodology capable of solving the fundamental problems of describing the plasma dynamics of active experiments in the ionosphere, including the analysis of their connection with external influences and global processes.

Using the developed toolset, it was possible to perform computer simulations of all key stages in a single calculation: from the immediate process of generating and releasing the jet (over several tens of microseconds) to the expansion of the plasma cloud in the magnetic field (over fractions of a second). This comprehensive approach made it possible, for the first time, to achieve quantitative agreement between the simulation results and the actual readings of ion concentration sensors during the release of a single aluminum jet at an altitude of 270 km (the «North Star - II» experiment). In the «North Star - I» experiment (at an altitude of 360 km), the outflow of aluminum plasma was preceded by the release of compressed air. This additional stage was planned to create a denser surrounding environment, corresponding to earlier experiments conducted at an altitude of 140 km. In this experiment, anomalously high photometer readings were observed, more than an order of magnitude higher than those from the single jet. The created methodology made it possible to unambiguously link such a high radiation flux to the process of plasma interaction with the pre-released air.

Increasing the energy of the plasma jet will allow for longer observations and a more thorough investigation of its interaction process with the geomagnetic field. This can be achieved by merging several plasma jets into one, more powerful jet. The parameters of the plasma formation resulting from such interaction, which demonstrate the promise of this multi-jet scenario, were predicted using the developed methodology. Another promising direction is planning the release of a jet into the Earth's exosphere (at an altitude of more than 500 km). Active experiments in near-space conditions in the future may open up possibilities for a more detailed study of astrophysical processes than is possible with laboratory facilities on Earth.

ОБНАРУЖЕНИЕ ВОЛН I2 И I4 В КОДЕ СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

О. А. Усольцева*, В. М. Овчинников

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

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

В настоящее время требуются новые подтверждения гипотезы о присутствии в центре внутреннего ядра Земли специфической области IMIC (*innermost inner core*) и ее свойствах. Это очень важно, так как ее наличие может свидетельствовать о существовании нескольких этапов в формировании и эволюции ядра Земли, в частности, о быстрой аккреции в течение 50–100 млн лет с последующим медленным ростом ядра за 1.5–2 млрд лет.

Для количественного описания скоростных и анизотропных особенностей IMIC и его размеров с помощью объемных волн необходимы землетрясения, с одной стороны, большой магнитудой, а с другой малой – длительностью временной функции источника (ВФИ). Мы проанализировали 2-х часовое волновое поле после землетрясения на Камчатке с $M = 8.8$ (52.512° с.ш., 160.324° в.д., глубина 35 км) и сверхдлинной ВФИ, произошедшего 29.07.2025 г., для выявления сейсмических фаз, связанных с центральной частью внутреннего ядра Земли, с использованием двух методов обработки. Во-первых, регулируемого направленного приема, опирающегося на анализ прямого волнового поля более чем 2800 сейсмограмм на эпицентральных расстояниях от 0° до 150° в частотном диапазоне 0.015–0.03 Гц. В ближней зоне до 40° идентифицированы волны I2 (PKIKPPKIKP) и I4 (PKIKPPKIKPPKIKPPKIKP), прошедшие 2 и 4 раза через внутреннее ядро, при этом угол между направлением сейсмического луча и осью вращения Земли составлял 30° – 60° . Форма выделенных волн сравнена с ВФИ. Во-вторых, анализа кросс-корреляционного волнового поля поздней коды Камчатского землетрясения, построенного методом сейсмической интерферометрии. При обработке сейсмограмм использовались разные типы нормализации данных и подбор оптимальных значений для данного события со сложной временной функцией источника. Продемонстрирована работоспособность метода для землетрясений с длинной (4 мин) ВФИ и изменяющейся скоростью разрыва. Идентифицированы кросс-корреляционные аналоги волны PKIKP на расстояниях 140° – 160° и волны I2 на 0° – 30° .

Полученные результаты указывают на возможность расширения области применения сейсмических методов, используемых в настоящее время для исследования центральной части земного ядра, за счет мощных землетрясений.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012200561-3).

DETECTION OF I2 AND I4 WAVES IN STRONG EARTHQUAKE CODE

O. A. Usoltseva*, V. M. Ovchinnikov

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

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

New evidence is currently required to support the hypothesis regarding the presence of a specific region, the IMIC (*innermost inner core*), at the center of the Earth's inner core and its properties. This is very important, as its existence could indicate several stages in the formation and evolution of the Earth's core, specifically, rapid accretion over 50–100 million years followed by slow core growth over 1.5–2 billion years.

To quantitatively describe the velocity and anisotropic characteristics of the Inner Core (IC) and its dimensions using body waves, earthquakes are required that, on one hand, have a large magnitude, and on the other, a short duration of the source time function (STF). We analyzed the 2-hour wavefield following the Kamchatka earthquake with $M = 8.8$ (52.512° N, 160.324° E, depth 35 km) and an extremely long STF, which occurred on July 29, 2025, with the aim of identifying seismic phases associated with the central part of the Earth's inner core using two processing methods. First, using beamforming, based on the analysis of the direct

wavefield from more than 2800 seismograms at epicentral distances from 0° to 150° in the frequency range of 0.015–0.03 Hz. In the near zone up to 40° , waves I2 (PKIKPPKIKP) and I4 (PKIKPPKIKPPKIKPPKIKP) were identified, which have passed through the inner core 2 and 4 times, respectively, with the angle between the seismic ray direction and the Earth's rotation axis being 30° – 60° . The waveform of the identified waves was compared with the STF. Second, using cross-correlation analyses of the seismic late coda of the Kamchatka earthquake, constructed using the seismic interferometry method. Different types of data normalization and selection of optimal parameters for this event with a complex source time function were used in processing the seismograms. The method is shown to be working for earthquakes with long (4 min) STF and variable rupture velocity. Cross-correlation analogs of the PKIKP wave at distances of 140° – 160° and the I2 wave at 0° – 30° were identified.

The obtained results indicate the possibility of expanding the scope of seismic methods currently used to study the central part of the Earth's core by utilizing powerful earthquakes.

ФАКТОРЫ, ПРИВОДЯЩИЕ К ВОЗНИКНОВЕНИЮ ГОРНО-ТЕКТОНИЧЕСКИХ УДАРОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Ю. В. Федотова*, И. Ю. Рассказов, М. И. Потапчук

*Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук – обособленное подразделение
Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии
наук, Хабаровск, Россия*

**E-mail: f Julia@mail.ru*

Горно-тектонические удары относятся к катастрофическим явлениям по масштабам своего воздействия не только на горные выработки, но и поверхность. При разработке рудных месторождений эти явления могут приводить к длительной приостановке ведения горных работ и существенным затратам на восстановление нарушенных инженерных конструкций и коммуникаций, а также, в отдельных случаях, к полному прекращению работ, закрытию предприятия и значительным убыткам.

В массивах интрузивных пород горно-тектонические удары могут быть обусловлены разными факторами – как природными, так и техногенными. К природным относятся землетрясения, интенсивные водопритоки, обильные снегопады, наличие активных разломов и т.д. К техногенным – взрывные работы, изъятие и перемещение горной массы, пригрузка и разгрузка больших площадей на поверхности, комбинированная система разработки, сближенные рудники, глубина разработки и т.д. Соответственно, механизм конкретных событий под влиянием отдельных или совокупности нескольких факторов (например, сложные горно-геологические условия разработки месторождения плюс обильные водопритоки) тоже будет различен. Процессы деформации и трещинообразования в массиве горных пород являются результатом отражения проявления факторов (отдельных или их совокупности). А степень качественного (косвенное, прямое) или количественного (сильное, среднее, слабое) влияния отдельных факторов – в зависимости от анализируемого масштабного уровня.

На примере ряда разрабатываемых удароопасных рудных месторождений рассмотрены влияния различных факторов и их совокупностей на причины реализации зарегистрированных на них горно-тектонических ударов и их последствия. Выполненный анализ показал, что характер изменения напряженно-деформированного состояния при ведении горных работ на месторождениях полезных ископаемых в магматических комплексах обусловлен сформированным мозаичным природным полем напряжений внутри интрузива за счет его иерархично-блочного строения и ростом новых магистральных разрывов (техногенных разрывных нарушений). При этом степень изменения зависит с одной стороны от генезиса, формы, глубины залегания месторождения, проявленности в рельефе поверхности, а с другой – применяемой технологии, интенсивности и масштабов освоения месторождения, а также благоприятного направления разрывных нарушений для подвижек блоков.

В целом, результаты выполненных исследований позволили авторам разделить причины горно-тектонических ударов на три группы – преимущественно природные, совместные и преимущественно техногенные. При учете выявленной специфики реализации горно-тектонических ударов ожидается возможным повысить вероятность прогноза таких явлений, что позволит разработать превентивные мероприятия по их предотвращению и минимизации последствий их реализации, то есть обеспечить безопасность ведения работ на удароопасных месторождениях.

FACTORS LEADING TO THE OCCURRENCE OF MINING-INDUCED EARTHQUAKES DURING THE DEVELOPMENT OF ORE DEPOSITS

Yu. V. Fedotova*, I. Y. Rasskazov, M. I. Potapchuk

Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences is a separate division of the Federal Budgetary State Institution of Science of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

**E-mail: f Julia@mail.ru*

Mining-induced earthquakes are considered catastrophic phenomena in terms of their impact not only on mining workings, but also on the surface. During of the ore deposits development, these phenomena can lead to a prolonged suspension of mining operations and significant costs for the restoration of damaged engineering structures and communications, as well as, in some cases, are finished of work, closure of the enterprise and significant losses.

In intrusive rock massifs, mining-induced earthquakes can be caused by various factors, both natural and man-made. Natural phenomena include earthquakes, intense water flows, heavy snowfall, active faults, etc. Man-made operations include blasting, removal and movement of rock mass, loading and unloading of large areas on the surface, a combined mining system, converging mines, depth of development, etc. Accordingly, the mechanism of specific events under the influence of individual or a combination of several factors (for example, difficult mining and geological conditions of deposit development + abundant water flows) will also be different. The processes of deformation and cracking in a rock mass are the result of the manifestation of factors reflection (individual or their combination). And the degree of qualitative (indirect, direct) or quantitative (strong, medium, weak) influence of individual factors depends on the analyzed scale level.

Using the example of a number of rockburst hazardous ore deposits under development, the effects of various factors and their combinations on the causes of the mining-induced earthquakes registered on them and their consequences are considered. The performed analysis showed that the nature of changes in the stress-strain state during mining operations at mineral deposits in magmatic complexes is due to the mosaic-shaped natural stress field inside the intrusive due to its hierarchical block structure and the growth of new mainline ruptures (man-made discontinuities). At the same time, the degree of change depends, on the one hand, on the genesis, shape, depth of the deposit, the appearance in the surface relief, and, on the second hand, on the technology used, the intensity and scale of deposit development, as well as the favorable direction of discontinuous faults for block movements.

In general, the results of the performed studies allowed the authors to divide the causes of mining-induced earthquakes into three groups – mainly natural, joint and mainly man-made. Taking into account the identified specifics of the mining-induced earthquakes implementation, it is expected that it will be possible to increase the probability of predicting such phenomena, which will make it possible to develop preventive measures to forecast them and minimize the consequences of their implementation, that is, to ensure the safety of operations at rockburst hazardous ore deposits.

**ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ОЦЕНКИ КОНЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ПО
ДАННЫМ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН: ПРИМЕР ИЛИН-ТАССКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ
14 ФЕВРАЛЯ 2013 г. ($M_w=6.7$, ЯКУТИЯ)**

А. И. Филиппова^{1, 2, *}, А. С. Фомочкина^{1, 3}

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук, Троицк, Россия

²Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук, Москва, Россия

³Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, Москва, Россия

*E-mail: aleirk@mail.ru

В данной работе проведены детальные исследования сильнейшего за инструментальный период наблюдений Илин-Тасского землетрясения ($M_w = 6.7$), произошедшего 14 февраля 2013 г. на северо-востоке Якутии, в сеймотектонической зоне Черского. Очаговые параметры исследуемого сейсмического события были рассчитаны по амплитудным спектрам поверхностных волн, зарегистрированных на телесейсмических расстояниях. Вначале очаг был смоделирован в приближении мгновенного точечного источника [1], а затем рассмотрен в приближении плоской дислокации эллиптической формы и конечной длительности [2]. Оценки проводились для различных скоростных моделей земной коры в окрестности рассматриваемого землетрясения. Как и в приближении мгновенного точечного источника, было показано, что выбор различных моделей среды практически не влияет на результаты расчетов. Кроме того было проведено исследование влияния набора исходных данных, в результате чего были сформулированы критерии (наличие данных в определенных азимутальных створах), при которых искомые параметры очага определяются устойчиво. Для этого использовался статистический метод «складного ножа». Также было проанализировано влияние на значения очаговых параметров записей сейсмических станций, расположенных в направлениях близких к простиранию истинной плоскости разрыва и перпендикулярных ему, а также записи станций, являющихся единственными в большом азимутальном окне. Наши оценки в приближении мгновенного точечного источника хорошо согласуются с данными, которые предоставляют мировые геофизические службы (GCMT, NEIC и др.). Конечные размеры очага для этого события получены нами впервые. Выполненные оценки интегральных параметров очага, характеризующих геометрию разрыва и его развитие во времени, были сопоставлены с независимой геолого-геофизической информацией. Сравнение продемонстрировало хорошую согласованность наших результатов с имеющимися представлениями об активных разломах региона и с геометрией эпицентрального поля афтершоков, зарегистрированных за первый месяц после главного толчка.

Литература

1. Букчин Б.Г. Об определении параметров очага землетрясения по записям поверхностных волн в случае неточного задания характеристик среды // Известия АН СССР. Серия Физика Земли. 1989. № 9. С. 34–41.
2. Букчин Б.Г. Описание очага землетрясения в приближении вторых моментов и идентификация плоскости разлома // Физика Земли. 2017. № 2. С. 76–83. <https://doi.org/10.7868/S0002333717020041>

ROBUSTNESS OF EARTHQUAKE FINITE-FAULT PARAMETERS FROM SURFACE WAVE DATA: AN EXAMPLE OF THE FEBRUARY 14, 2013 ILIN-TASS EARTHQUAKE (MW = 6.7, YAKUTIA)

A. I. Filippova^{1,2,*}, A. S. Fomochkina^{1,3}

¹*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation Russian Academy of Science, Moscow, Russia*

²*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of Russian academy of sciences, Moscow, Russia*

³*Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russia*

*E-mail: aleirk@mail.ru

In this study, we consider in detail the strongest during the instrumental period of observations Ilin-Tass earthquake ($M_w = 6.7$) occurred on February 14, 2013 in the north-east of Yakutia, in the Chersky seismotectonic zone. Source parameters of this seismic event are estimated from amplitude spectra of surface waves registered at teleseismic distances. At the first step, the source is modeled in an instant point source approximation. At the second step, it is considered as an elliptical plane dislocation with a finite duration. Calculations are performed with different crustal velocity models in the vicinity of the earthquake source. As in an instant point source approximation, it has been shown that the choice of the crustal model does not change significantly the obtained results on finite-fault parameters. Additionally, an influence of the initial dataset is tested and some criteria (availability of data in certain azimuthal sections) have been formulated, under which the source parameters are robustly determined. For this purpose, the statistical «jackknife» method is used. The influence of records from seismic stations located in directions close to the strike of the fault plane and perpendicular to it, as well as records from stations that are the only ones in a large azimuthal window, on the values of source parameters is also analyzed. Our estimates in an instant point source approximation are close to data published by international seismological agencies (GCMT, NEIC, etc.). Finite-fault parameters for the considered earthquake have been determined for the first time in this study. We compare the obtained estimates of integral source parameters, characterizing the fault geometry and its time development, with independent geological and geophysical data. The comparison has demonstrated a good agreement of our results with information on regional active faults and with geometry of the epicentral field of the aftershocks registered during the first month after the mainshock

РОССИЙСКИЙ ПРОЕКТ «ИОНОЗОНД»

А. А. Чернышов* и команда проекта «Ионозонд»

Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: achernyshov@cosmos.ru*

Представлены основные цели и задачи научных экспериментов космической миссии «Ионозонд», состоящий из четырех космических аппаратов (КА) «Ионосфера-М» (две пары спутников), по изучению и мониторингу физических процессов в верхней атмосфере, ионосфере и магнитосфере Земли, а также их взаимосвязи с солнечной активностью и космической погодой. Для этого на спутниках установлены различные научные приборы для измерения параметров ионосферной плазмы и электромагнитных излучений. В рамках проекта «Ионозонд» осуществлен запуск первой пары КА в ноябре 2024 г., вторая пара была выведена на орбиту в июле в 2025 г. с комплексом научных приборов, обеспечивающих контроль гелиогеофизической обстановки в околоземном космическом пространстве. КА «Ионосфера-М» функционируют на околокруговой солнечно-синхронной орбите в двух орбитальных плоскостях (по 2 спутника в каждой плоскости). Ионосфера находится под постоянным воздействием природных и антропогенных факторов, параметры ионосферной плазмы постоянно варьируются, а характерные времена внешних и внутренних воздействий различной природы, а также длительность релаксации после них, могут составлять от нескольких минут до нескольких суток. Поэтому прогноз состояния ионосферы остается сложной задачей. Это связано как с недостаточным пониманием некоторых физических процессов, так и с ограниченностью данных спутниковых измерений непосредственно в ионосферной плазме. Для детального изучения ионосферы требуются специализированные спутниковые миссии, состоящие из нескольких КА, обеспечивающие непрерывное измерение различных параметров плазмы и постоянный мониторинг состояния околоземного космического пространства. В докладе представлены первые научные результаты, полученные с использованием спутниковых данных «Ионосфера-М».

RUSSIAN PROJECT «IONOZOND»

A. A. Chernyshov* and the «Ionozond» project team

Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: achernyshov@cosmos.ru*

The main goals and objectives of the scientific experiments of the Ionozond space mission, consisting of four Ionosfera-M spacecraft (two pairs of satellites), are presented. The mission is focused on studying and monitoring physical processes in the Earth's upper atmosphere, ionosphere, and magnetosphere, as well as their relationship with solar activity and space weather. To this end, the satellites are equipped with various scientific instruments for measuring ionospheric plasma parameters and electromagnetic radiation. As part of the Ionozond project, the first pair of spacecraft was launched in November 2024, and the second pair was placed into orbit in July 2025, carrying a suite of scientific instruments to monitor the heliogeophysical conditions in near-Earth space. The Ionosfera-M satellites operate in near-circular sun-synchronous orbits in two orbital planes (two satellites in each plane). The ionosphere is constantly influenced by natural and anthropogenic factors; ionospheric plasma parameters vary continuously, and the characteristic times of external and internal influences of various natures, as well as the relaxation time after them, can range from several minutes to several days. Therefore, forecasting the state of the ionosphere remains a challenging task. This is due both to insufficient understanding of certain physical processes and to the limited availability of satellite measurement data directly within the ionospheric plasma. Detailed study of the ionosphere requires specialized satellite missions consisting of multiple spacecraft that provide continuous measurements of various plasma parameters and constant monitoring of the state of near-Earth space. This report presents the first scientific results obtained using data from the Ionosfera-M satellites.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ ФРАГМЕНТАЦИИ ГЕОСРЕДЫ ПРИМОРСКОГО РАЗЛОМА

В. Е. Чинкин*, А. А. Остапчук

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: chinkin.ve@idg.ras.ru*

Тектонические напряжения вызывают деформацию и разрушение горных пород. Мы исследовали статистику фрагментации хрупких пород, составляющих зону разрушения Приморского разлома Байкальской рифтовой зоны, в масштабах от микрон до километров. Анализируемые породы разлома включают различные литологии и величины сдвиговых деформаций. В работе использовался алгоритм, основанный на сверточной нейронной сети для автоматического картирования трещин на изображениях и разломов в топографических данных. Данные подвергались проверке статистической гипотезе на степенное, логнормальное или закон Вейбулла. Проверка основана на критерии Колмогорова–Смирнова. Оказалось, что фрагментация пород в ядре разлома подчиняется логнормальной статистике на всех рассматриваемых масштабах, при этом параметр формы сохраняется и был равен 1.4–2.0. Показано, что усечение данных распределения может привести к неверным выводам о степенном законе распределения.

Мы предложили математическую модель квази-Колмогоровской фрагментации для описания экспериментальных данных с логарифмическим распределением. Модель основана на двух условиях: i) вероятность разрушения любого фрагмента на любом этапе процесса не зависит от его размера, наличия других фрагментов и числа предшествующих событий разрушения; ii) интенсивность фрагментации уменьшается с уменьшением размера фрагмента по степенному закону с малым положительным показателем степени. На основе линейного уравнения фрагментации показано, что для широкого класса самоподобных ядер фрагментации, распределение размеров фрагментов асимптотически логнормально при больших временах в пределе малого показателя степени интенсивности фрагментации, при этом параметр формы сохраняется и зависит только от показателя. Квази-Колмогоровская модель фрагментации обеспечивает количественное описание экспериментальных данных, полученных для Приморского разлома в Байкальской рифтовой зоне в масштабах от 10^{-6} до 10^4 м.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012700824-4).

STATISTICAL MODEL OF TECTONIC FRAGMENTATION OF THE GEOENVIRONMENT OF THE PRIMORSKY FAULT

V. E. Chinkin*, A. A. Ostapchuk

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

** E-mail: chinkin.ve@idg.ras.ru*

Tectonic stresses cause deformation and destruction of rocks. We studied the fragmentation statistics of brittle rocks constituting the damage zone of the Primorsky Fault in the Baikal Rift Zone, across scales ranging from microns to kilometers. The analyzed fault rocks include various lithologies and magnitudes of shear strain. We use an algorithm based on a convolutional neural network for automatic mapping of cracks in images and faults in topographic data, and statistically test for the presence of a power-law, lognormal, or Weibull distribution. It was found that rock fragmentation in the fault core follows lognormal statistics across all scales from 10^{-6} m to 10^4 m, with the shape parameter remaining constant at 1.4–2.0. It is shown that truncation of distribution data can lead to erroneous conclusions about a power-law distribution.

We proposed a mathematical model of quasi-Kolmogorov fragmentation to describe the experimental data exhibiting a logarithmic distribution. The model is based on two conditions: i) the probability of fragmentation of any fragment at any stage of the process is independent of its size, the presence of other fragments, and the number of preceding fragmentation events; ii) the fragmentation intensity decreases with decreasing fragment size according to a power law with a small positive exponent. Based on the linear fragmentation equation, it is shown that for a wide class of self-similar fragmentation kernels, the fragment size distribution is asymptotically lognormal at large times in the limit of a small exponent of fragmentation intensity, with the shape parameter remaining constant and depending only on the exponent. The quasi-Kolmogorov fragmentation model provides a quantitative description of the experimental data obtained for the Primorsky Fault in the Baikal Rift Zone across scales from 10^{-6} to 10^4 m.

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА С КРУПНЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ ПО ДАННЫМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Т. К. Чумаков*, Е. В. Зенченко, П. Е. Зенченко, С. Б. Турунтаев

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: chumakov.tk@idg.ras.ru*

В работе представлены результаты лабораторного исследования распространения трещины гидроразрыва в модельном материале, содержащем крупные неоднородности. Изучение взаимодействия трещины гидроразрыва с включениями представляет значительный интерес для понимания механизмов развития трещин в реальных геологических средах, где структура пород характеризуется наличием неоднородностей различного масштаба и происхождения.

Эксперименты проводились на цилиндрических образцах с центральной скважиной, изготовленных из гипсоцементной смеси и промышленного наливного пола. Для формирования структурной неоднородности в образцы вводились включения из альтернативного материала, обладающего отличающимися физико-механическими свойствами. Конфигурация включений подбиралась таким образом, чтобы обеспечить взаимодействие распространяющейся трещины гидроразрыва с границами раздела материалов в процессе её роста.

Перед проведением экспериментов были исследованы основные физико-механические характеристики используемых материалов, включая прочность при сжатии и растяжении, плотность, модуль упругости и проницаемость. Это позволило корректно интерпретировать наблюдаемые особенности формирования трещины гидроразрыва.

Процесс образования и роста трещины регистрировался методом акустической эмиссии с использованием пьезоэлектрических датчиков, размещённых на поверхности экспериментальной сборки. Одновременно осуществлялась регистрация давления жидкости в скважине. Обработка данных включала выделение импульсов акустической эмиссии, определение времени их вступления и локацию источников сигналов с использованием времён прихода упругих волн.

Показано, что при взаимодействии с включениями трещина гидроразрыва не пересекает их, а распространяется вдоль границы раздела материалов, огибая включения. После выхода из зоны неоднородности трещина продолжает рост в основном материале образца. Установлено, что процесс роста трещины сопровождается ступенчатым увеличением накопленной активности акустической эмиссии. Интервалы интенсивного роста соответствуют распространению трещины в основном материале, тогда как участки пониженной активности связаны с её распространением вдоль границ включений.

Результаты локации источников акустической эмиссии показывают, что их пространственное распределение хорошо согласуется с траекторией трещины, наблюдаемой на поверхности образцов после проведения экспериментов. Это подтверждает возможность использования метода акустической эмиссии для детального анализа динамики развития трещин гидроразрыва.

Полученные результаты свидетельствуют о существенном влиянии крупных неоднородностей на характер распространения трещины гидроразрыва и могут быть использованы при интерпретации аналогичных процессов в природных геологических средах.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012100531-7).

FEATURES OF HYDRAULIC FRACTURE INTERACTION WITH LARGE HETEROGENEITIES BASED ON ACOUSTIC EMISSION DATA

T. K. Chumakov*, E. V. Zenchenko, P. E. Zenchenko, S. B. Turuntaev

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

**E-mail: chumakov.tk@idg.ras.ru*

The paper presents the results of a laboratory study of hydraulic fracture propagation in a model material containing large heterogeneities. The investigation of fracture interaction with inclusions is of significant interest for understanding fracture development mechanisms in real geological media, where rock structure is characterized by heterogeneities of various scales and origins.

The experiments were carried out on cylindrical samples with a central borehole, fabricated from a gypsum-cement mixture and a commercial self-leveling compound. Structural heterogeneity was introduced by embedding inclusions made of an alternative material with different mechanical properties. The configuration of the inclusions was designed to ensure interaction between the propagating hydraulic fracture and material interfaces during its growth.

Prior to the experiments, the main physical and mechanical properties of the materials were determined, including compressive and tensile strength, density, elastic modulus, and permeability. This allowed for a reliable interpretation of the observed features of hydraulic fracture formation.

The fracture initiation and propagation processes were monitored using the acoustic emission (AE) method with piezoelectric sensors mounted on the experimental assembly. Simultaneously, the fluid pressure in the borehole was recorded. Data processing included the detection of AE events, determination of their arrival times, and localization of the emission sources using travel-time analysis of elastic waves.

It is shown that upon interaction with inclusions, the hydraulic fracture does not penetrate them but propagates along the material interfaces, effectively bypassing the inclusions. After leaving the heterogeneous zone, the fracture continues to propagate in the host material. It is established that fracture growth is accompanied by a stepwise increase in cumulative acoustic emission activity. Periods of rapid AE growth correspond to fracture propagation in the host material, whereas intervals of reduced activity are associated with propagation along material interfaces.

The localization results demonstrate that the spatial distribution of AE sources is in good agreement with the fracture trajectory observed on the sample surface after the experiments. This confirms the applicability of the acoustic emission method for detailed analysis of hydraulic fracture dynamics.

The obtained results indicate a significant influence of large heterogeneities on hydraulic fracture propagation and can be used for interpreting similar processes in natural geological environments.

ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДВОДНЫХ СКЛОНОВ

З. З. Шарафиев*

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: zulfatsharafiev@yandex.ru*

В современной инженерной геологии и геомеханике проблема активизации оползневых процессов сохраняет высокую актуальность ввиду большого разнообразия и слабой изученности факторов потери устойчивости склонов. Одним из основных факторов является влияние естественной (динамические нагрузки, вызванные землетрясениями различной магнитуды) и техногенной сейсмичности (сейсмическое действие промышленных взрывов в горнодобывающих компаниях) на устойчивость склонов.

В настоящей работе изложены промежуточные результаты лабораторных экспериментов, которые направлены на изучение механизмов накопления деформации модельного подводного склона при многократных динамических воздействиях (вибрационное воздействие). Целью работы является определение критических параметров динамических характеристик устойчивости модельных подводных склонов.

Регистрация динамических характеристик осуществлялась с помощью высокоточного комплекса, состоящего из акселерометров Bruel & Kjaer 4370 для фиксации ускорений и 3D-сканера Volume Technologies VT MINI. Применение последнего оборудования обеспечило регистрацию поля смещений с микронной точностью (до 0.015 мм) и высоким разрешением (до 0.025 мм), что позволило детально отследить динамику разрушения после каждого динамического воздействия.

В ходе серии экспериментов моделировалось многократное динамическое воздействие на образцы с различной степенью влагонасыщения. Анализ полученных данных позволил количественно оценить параметры статической и динамической устойчивости модельных склонов. Установлено, что характер потери устойчивости существенно различается для сухих, водонасыщенных и частично подводных склонов. Выделены различные типы динамического разрушения. Методом 3D-корреляции цифровых изображений в структуре подводного склона локализованы зоны начальной концентрации напряжений.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда
(проект № 25-77-00035).*

EXPERIMENTAL STUDY ON THE DYNAMIC STABILITY OF UNDERWATER SLOPES

Z. Z. Sharafiev

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

**E-mail: zulfatsharafiev@yandex.ru*

In modern engineering geology and geomechanics, the problem of landslide activation remains highly relevant due to the great diversity and poor understanding of the main factors affecting slope stability. One of the key factors is the influence of both natural (dynamic loads caused by earthquakes of varying magnitudes) and technogenic seismicity (the seismic effect of industrial blasts in mining operations) on slope stability.

This paper presents the intermediate results of laboratory experiments aimed at studying the mechanisms of deformation accumulation in a model submarine slope under repeated dynamic (vibrational) impacts. The objective of the work is to determine the critical parameters of the dynamic characteristics affecting the stability of model submarine slopes.

The dynamic characteristics were recorded using a high-precision system consisting of Bruel & Kjaer 4370 accelerometers for measuring acceleration and a Volume Technologies VT MINI 3D scanner. The use of the latter equipment enabled the recording of the displacement field with micron accuracy (up to 0.015 mm) and high resolution (up to 0.025 mm), which allowed for detailed monitoring of the failure dynamics after each dynamic impact.

During a series of experiments, repeated dynamic loading was simulated on samples with varying degrees of water saturation. Analysis of the obtained data allowed for a quantitative assessment of the static and dynamic stability parameters of the model slopes. It was established that the nature of slope failure differs significantly for dry, water-saturated, and partially submerged slopes. Different types of dynamic failure were identified. Using the 3D digital image correlation method, the zones of initial stress concentration were localized within the structure of the submarine slope.

ИЗМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ РАЗЛОМНОЙ ЗОНЫ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

И. В. Шатунов^{1,2,*}, Г. Г. Кочарян¹

¹Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

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

*E-mail: shatunov.iv@phystech.edu

Динамическое воздействие на массив скальных пород приводит к локализации изменения проницаемости в разломных зонах. При этом механизм изменения проницаемости может быть различным. В работе выполнен статистический анализ результатов измерений параметров трещиноватости при крупных подземных взрывах в массивах скальных пород. Показано, что за пределами зоны интенсивного динамического воздействия (приведенные расстояния более $60 \text{ м/кт}^{1/3}$) образование новых трещин во вмещающем массиве практически не происходит. Однако, изменение трещиноватости локализуется на участках структурного ослабления массива: в зонах экзогенной трещиноватости, в местах развития интрузий и тектонических трещин, а также в большей степени в разломных зонах. При этом увеличение трещиноватости в разломах прослеживается на расстояниях до $220 \text{ м/кт}^{1/3}$. Выполнены расчеты изменения эффективной проницаемости разломных зон. Показано, что в приведенных расстояниях от 60 до $130 \text{ м/кт}^{1/3}$ при динамическом воздействии проницаемость за счет подновления трещин в разломных зонах способна возрастать в 5–15 раз по сравнению с исходной, что подтверждается как расчетами, так и прямыми исследованиями поствзрывных фильтрационных свойств массива.

В зоне динамических воздействий малой интенсивности, изменение проницаемости разломных зон может происходить за счет эффекта декольматации – процесса разрушения малопроницаемых коллоидных барьеров в трещинах. Прохождение сейсмической волны достаточной амплитуды приводит к разрушению перемычек из коллоидных пленок и минеральных частиц, закупоривающих трещины, что ведет к резкому увеличению проницаемости и пьезопроводности среды.

Кроме того, резкие перепады порового давления в моменты сейсмической активности создают кратковременные, но мощные потоки флюида. Флюид под высоким давлением буквально «вымывает» кольматант, очищая каналы фильтрации в зоне повреждения.

При землетрясениях, где высокие амплитуды волны напряжений достигаются только в непосредственной окрестности распространяющегося разрыва, эффект декольматации может оказаться весьма существенным. Как показывают оценки, амплитуды волны в несколько бар оказывается достаточным для разрушения барьеров как прямым динамическим воздействием, так и медленной диффузионной волной Био, возбуждаемой на границе зоны влияния разлома (*fault damage zone*). По некоторым сведениям, в момент декольматации коэффициент пьезопроводности может мгновенно увеличиться на 1–3 порядка. Очищенные трещины становятся «магистралями» для мантийных и метаморфогенных флюидов, что может способствовать инициации новых сейсмических событий из-за снижения эффективного напряжения в новых участках разлома.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012700824-4).

CHANGES IN THE EFFECTIVE PERMEABILITY OF A FAULT ZONE UNDER DYNAMIC LOADING

I. V. Shatunov^{1,2,*}, G. G. Kocharyan¹

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

²*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia*

*E-mail: shatunov.iv@phystech.edu

Dynamic loading of rock masses leads to localized permeability changes within fault zones. The mechanisms responsible for these permeability variations may differ. In this study, a statistical analysis was performed using fracture-parameter measurements obtained from large underground explosions in rock masses. It was shown that beyond the zone of intense dynamic loading (scaled distances greater than $60 \text{ m/kt}^{1/3}$), the formation of new fractures in the host rock is negligible. However, changes in fracturing become localized within structurally weakened parts of the massif, including zones of exogenic fracturing, areas affected by intrusive bodies and tectonic fractures, and, most prominently, fault zones. An increase in fracture intensity within faults is observed at distances up to $220 \text{ m/kt}^{1/3}$. Calculations of the effective permeability evolution in fault zones show that, at scaled distances between 60 and $130 \text{ m/kt}^{1/3}$, dynamic loading may increase permeability by a factor of 5–15 relative to its initial value due to fracture reactivation within the fault zone. This conclusion is supported both by model calculations and by direct post-blast investigations of the hydraulic properties of the rock mass. In the zone of weak dynamic loading, permeability changes in fault zones may occur through a unclogging mechanism, i.e., the destruction of low-permeability colloidal barriers within fractures. The passage of a seismic wave of sufficient amplitude may break down bridges formed by colloidal films and mineral particles that clog fractures, resulting in a sharp increase in permeability and hydraulic diffusivity. In addition, abrupt pore-pressure fluctuations during seismic activity generate short-lived but intense fluid fluxes. High-pressure fluids may effectively flush out clogging material, thereby clearing fluid-flow pathways within the damaged zone. During earthquakes, where high stress-wave amplitudes are reached only in the immediate vicinity of the propagating rupture, the unclogging effect may be particularly important. Estimates indicate that wave amplitudes of several bars may be sufficient to destroy such barriers, both through direct dynamic stressing and through the slow Biot diffusion wave excited at the boundary of the *fault damage zone*. According to some studies, the hydraulic diffusivity coefficient may increase instantaneously by 1–3 orders of magnitude during unclogging. Once reopened, fractures may become preferential pathways for mantle and metamorphic fluids, which can promote the initiation of new seismic events through a reduction in effective normal stress on adjacent fault segments.

НОВЫЙ МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ НЕРАВНОВЕСНЫХ СОСТОЯНИЙ ПРИ ВНЕЗАПНЫХ ВЫБРОСАХ В КВАЗИУСТОЙЧИВЫХ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТАХ НА ОСНОВЕ КИНЕТИКИ LEE–TARVER

И. Е. Шиповский*, В. А. Трофимов

Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия

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

Контекст и проблема. Внезапные выбросы угля и газа в газонасыщенных пластах характеризуются пороговостью, высокой скоростью развития и массовым выносом в выработку. Классические методы (пороупругость, критерии прочности, модели повреждения) не воспроизводят пороговый переход «устойчивое состояние → активированное разрушение → выброс» без эвристических переключателей режимов и часто чувствительны к численным параметрам.

Цель и задачи. Разработать воспроизводимый методический каркас применения кинетики Lee–Tarver (Ignition & Growth) для моделирования порогового перехода при выбросах как динамического дополнения к критериальным методикам оценки безопасности. Основные задачи: (1) адаптация структуры I&G к геомеханической постановке с переопределением переменной прогресса как доли активированного угля; (2) разработка набора входных и выходных показателей; (3) формирование практического алгоритма применения на шахте.

Методический подход. Предложено переопределение внутренней переменной прогресса F как доли активированного (поврежденного, газоотдающего) состояния угля с управляющим параметром, включающим газовый фактор (перепад давления), эффективные напряжения скелета и динамическую компоненту (интенсивность деформаций). Кинетика представлена трехчленной структурой: инициирование (пороговый запуск активной зоны при критических напряжениях и давлении), рост (лавинное развитие за счет положительной обратной связи «повреждение → проницаемость → газоразгрузка → разрушение») и затухание (исчерпание ресурса сорбированного газа и диссипация нагрузки). Идентификация параметров проводится по аналогам pop-plot (время до события vs нагрузка) и run-distance (длина разгона vs нагрузка), построенным на основе лабораторных испытаний и шахтного мониторинга.

Основные результаты. Сформулированы формы членов кинетики для инициирования, роста и затухания с явным описанием скорости перехода состояния. Разработаны функции деградации свойств угля (жесткость, прочность, проницаемость, пористость) в зависимости от уровня активации F , отражающие резкую нелинейность проницаемости при повреждении. Предложен практический пятиэтапный алгоритм применения на шахте: формирование входных данных, калибровка параметров модели, сценарный расчет выбросоопасности, интеграция с критериальной оценкой, выбор превентивных мероприятий. Составлена комплексная таблица входных показателей (газовое давление, напряженное состояние, параметры дегазации) и выходных метрик (время до события, длина разгона, максимальная доля активации, пик дебита, интегральный показатель безопасности).

Научная новизна и практическая значимость. Явное введение скорости перехода состояния через трехстадийную кинетику исключает потребность в эвристических переключателях режимов и повышает устойчивость численного прогноза пороговых явлений. Подход объединяет динамическое моделирование (методом сглаженных частиц, SPH) с интегральными оценками безопасности, обеспечивая ранжирование участков по риску и обоснованный выбор мер (дегазация, разгрузочные скважины, оптимизация взрывных работ, изменение темпа проходки). Физические параллели между детонацией в ВВ и внезапным выбросом (локальные очаги инициирования, положительная обратная связь, исчерпание энергетического ресурса) оправдывают перенос каркаса Lee–Tarver на геодинамическую задачу.

Ограничения и перспективы. Методика требует достаточной базы экспериментальных данных для калибровки параметров, включая испытания образцов угля, и корректного многопараметрического

мониторинга газового режима в пласте. Дальнейшие исследования направлены на расширение подсистемы газообмена (сорбция/десорбция по модели Лэнгмюра), верификацию по натурным многопараметрическим данным шахт и создание цифровых двойников выбросоопасных участков для оптимизации управления риском в реальном времени.

Выводы. Применение кинетики Lee–Tarver в сочетании с методом сглаженных частиц представляет эффективный инструмент для численного моделирования выбросов угля и газа в газонасыщенных пластах, учитывающий большие деформации, фрагментацию и сложное взаимодействие механических и газодинамических процессов. Предложенный методический каркас успешно воспроизводит пороговый режим развития процесса без эвристических вмешательств и может быть внедрен в практику оценки безопасности горных работ как динамическое дополнение к существующим критериальным методикам, (подход Яхеева), обеспечивая обоснованное управление риском выбросов на уровне участка и забоя.

SIMULATION THE THRESHOLD TRANSITION IN SUDDEN OUTBURSTS IN GAS-SATURATED COAL SEAMS: THE NEW KINETIC APPROACH BASED ON LEE–TARVER THEORY

I. E. Shipovsky*, V. A. Trofimov

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

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

Sudden outbursts of coal and gas in gas-saturated seams are characterized by threshold behavior, rapid propagation rates, and catastrophic material ejection into mine workings. Classical approaches – including poroelasticity, strength criteria, and damage models – fail to reproduce the threshold transition from stable equilibrium through activated failure to dynamic rupture without ad hoc regime-switching mechanisms and often exhibit sensitivity to numerical parameters.

We develop a reproducible methodological framework applying Lee–Tarver kinetics (Ignition & Growth) to model the threshold transition governing sudden outbursts as a dynamic complement to safety assessment criteria. Primary tasks include: (1) adapting the I&G structure to geomechanical formulation by redefining the progress variable as the activated (damaged, gas-releasing) fraction of coal; (2) establishing input and output metrics; (3) formulating a practical five-step operational algorithm for field implementation

Methodology. We redefine the internal progress variable F as the activated coal fraction, controlled by a composite parameter incorporating gas overpressure, effective skeleton stresses, and deformation-rate intensity. Three-stage kinetics is proposed: ignition (threshold activation of failure zones at critical stress and pressure), growth (avalanche development via positive feedback: damage $\rightarrow$ permeability $\rightarrow$ gas unloading $\rightarrow$ fracture), and decay (adsorbed gas depletion and load dissipation). Parameter identification relies on pop-plot (time-to-event vs. load) and run-distance (run-up length vs. load) analogues constructed from laboratory testing and mine monitoring data.

Results. We formulate kinetic rate laws for ignition, growth, and decay stages with explicit description of state-transition velocity. Coal property degradation functions – accounting for stiffness, strength, permeability, and porosity changes as functions of activation level F – capture the pronounced nonlinearity of permeability upon damage. A practical five-stage algorithm is proposed: (1) input data assembly; (2) model parameter calibration; (3) outburst-hazard scenario calculations; (4) integration with criteria-based safety assessment; (5) selection of preventive measures. Comprehensive tables specify input metrics (gas pressure, stress state, degassing parameters) and output indicators (time-to-event, run-up length, peak activation fraction, gas discharge rate, integral safety index).

Scientific Innovation. Explicit incorporation of state-transition rate through three-stage kinetics eliminates reliance on heuristic regime switches and enhances robustness of threshold-phenomenon forecasting. The approach unifies dynamic simulation (via smoothed particle hydrodynamics) with integral safety assessment, enabling risk-stratified ranking of mine sectors and justified selection of mitigation measures (degassing,

stress-relief wells, blasting optimization, extraction-rate adjustment). Physical analogues between explosive detonation and coal-gas outbursts – including local ignition sites, positive feedback loops, and energy resource exhaustion – justify transferring the Lee–Tarver framework to geodynamic applications.

Prospects. The methodology requires sufficient experimental data for parameter calibration, including coal sample testing, and robust multiparametric in-situ gas-regime monitoring. Future work will expand gas-exchange modeling (adsorption/desorption via Langmuir kinetics), verify predictions against multiparametric field data, and develop digital twins of outburst-prone zones for real-time risk management optimization.

Conclusions. Lee–Tarver kinetics combined with SPH method provides an effective computational tool for modeling sudden coal-and-gas outbursts in gas-saturated seams, accommodating large deformations, fragmentation, and complex mechanical-gas-dynamic coupling. The proposed framework successfully reproduces threshold-driven dynamics without ad hoc intervention and is readily deployable as a dynamic enhancement to existing mining safety assessment methodologies, enabling defensible outburst-risk management at the panel and face level.

СХОДИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ ПЕСЧАНИКОВ

Н. М. Шихова*, А. В. Патонин

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

*E-mail: shinami@yandex.ru

В работе представлены результаты лабораторного моделирования триггерной активизации на пяти типах песчаников различного происхождения – Berea, Castlegate, Bentheim, Buffalo и BleursWiller. Эксперименты проводились на сервогидравлическом прессе Inova при циклическом нагружении с избыточным осевым напряжением 20–70 МПа при всестороннем давлении 10–30 МПа. Максимальное напряжение в цикле составляло 40–50% от предела прочности исследованных песчаников при заданном всестороннем давлении, что позволяет рассматривать циклическое воздействие как слабые триггерные возмущения, аналогичные приливным деформациям в природных условиях. Мониторинг процесса накопления повреждений осуществлялся с помощью 16-канальной системы акустической эмиссии, обеспечивающей трёхмерную локацию событий с точностью 2 мм и определение типа механизма разрушения по оригинальной методике AESAM + ISO [1].

В качестве индикаторов разрушения анализировались коэффициент Фелисити (FR), параметр *b-value*, доли типов событий акустической эмиссии (DC, CLVD, ISO) и фрактальная размерность пространственного распределения гипоцентров (D). Анализ полученных данных выявил устойчивую закономерность, наблюдаемую независимо от типа песчаника: непосредственно перед макроскопическим разрушением все образцы демонстрируют сходимость ключевых параметров к единым критическим значениям. FR снижается ниже 0.4, что свидетельствует о переходе к необратимому накоплению микроповреждений; энергетический параметр *b-value* падает до значения ~ 0.4 , указывая на доминирование крупных событий АЭ на финальной стадии [2]; фрактальная размерность пространственного распределения гипоцентров снижается до $D \approx 2.0$, что соответствует формированию практически плоской поверхности разлома. При этом литологические различия проявляются не в финальных величинах, а в скорости достижения критических значений. Наименьшее время до разрушения зафиксировано для песчаника Castlegate, наибольшее – для Berea. Промежуточные значения наблюдаются у Buffalo, BleursWiller и Bentheim.

Особый интерес представляет динамика типов механизмов разрушения. На ранних стадиях нагружения доминирующий тип события варьируется в зависимости от образца: в песчаниках Buffalo и Berea преобладают сдвиговые механизмы (DC, 60–80%), в Bentheim – смешанные механизмы (CLVD, 50–60%), в BleursWiller наблюдается более равномерное распределение типов. Однако на финальной стадии все образцы демонстрируют единый сценарий – рост доли смешанных и изотропных событий до 30–70%. У BleursWiller зафиксирована выраженная антикорреляция *b-value* с фазой цикла нагрузки, что указывает на активизацию локальных зон разупрочнения в фазе разгрузки; у Buffalo наблюдается платообразная динамика FR с последующим резким падением.

Полученные результаты позволяют сформулировать многопараметрический критерий оценки готовности разломной зоны к разрушению под действием слабых циклических напряжений. Критическое состояние соответствовало одновременному выполнению условий: $FR < 0.4$, $b\text{-value} < 0.4$, доля DC < 65%, $D < 2.1$. Достижение этой комбинации зафиксировано за 3–10 с до макроскопического разрушения во всех экспериментах независимо от типа песчаника. Использование критерия для любого параметра по отдельности приводит к ложным срабатываниям.

Результаты работы в совокупности с анализом данных других исследователей позволяют заключить, что триггерная активизация разломных зон в песчаниках под действием слабых циклических напряжений следует универсальному сценарию, независимому от микроструктурных особенностей породы.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФЗ РАН в Центре коллективного пользования «Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм» ИФЗ РАН.

Авторы благодарны д.ф.-м.н. В. Б. Смирнову и д.ф.-м.н. А. В. Пономареву за ценные замечания по методологии анализа.

Литература

1. Shikhova N., Patonin A. Methods for determining focal mechanisms in laboratory experiments // EGU General Assembly 2021. EGU21-3305.
2. Смирнов В.Б., Пономарёв А.В. Физика переходных режимов сейсмичности. М.: РАН. 2020. – 412 с.

CONVERGENCE OF DAMAGE PARAMETERS IN SANDSTONES UNDER CYCLIC LOADING

N. M. Shikhova, A. V. Patonin

Geophysical Observatory Borok – branch of the O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Borok, Russia

**E-mail: shinami@yandex.ru*

This study presents the results of laboratory modeling of triggered activation on five types of sandstones of various origins – Berea, Castlegate, Bentheim, Buffalo, and Bleurswiller. The experiments were conducted on an Inova servohydraulic press under cyclic loading with differential axial stress of 20–70 MPa and confining pressure of 10–30 MPa. The peak stress within the cycle amounted to 40–50% of the strength limit of the studied sandstones at the given confining pressure, allowing the cyclic loading to be considered as weak trigger perturbations analogous to tidal deformations under natural conditions. Monitoring of the damage accumulation process was performed using a 16-channel acoustic emission system, providing 3D location of events with an accuracy of 2 mm and determination of the failure mechanism type using the original AESAM + ISO technique.

The following failure indicators were analyzed: the Felicity Ratio (FR), the *b-value* parameter, the proportions of acoustic emission event types (DC, CLVD, ISO), and the fractal dimension of the spatial distribution of hypocenters (D). Analysis of the obtained data revealed a robust pattern observed regardless of the sandstone type: immediately prior to macroscopic failure, all samples demonstrated convergence of key parameters to unified critical values. The FR drops below 0.4, indicating a transition to irreversible accumulation of microdamage; the energy parameter *b-value* decreases to ~ 0.4 , indicating the dominance of large AE events at the final stage; the fractal dimension of the spatial distribution of hypocenters decreases to $D \approx 2.0$, corresponding to the formation of a nearly planar fault surface.

Of particular interest is the dynamics of the failure mechanism types. At early loading stages, the dominant event type varies depending on the sample: shear mechanisms (DC, 60–80%) prevail in Buffalo and Berea sandstones, mixed mechanisms (CLVD, 50–60%) in Bentheim, and a more uniform distribution of types is observed in Bleurswiller. However, at the final stage, all samples demonstrate a unified scenario – an increase in the proportion of mixed and isotropic events to 30–70%.

The obtained results allow for the formulation of a multiparametric criterion for assessing the readiness of a fault zone for failure under weak cyclic stresses. The critical state corresponded to the simultaneous fulfillment of the following conditions: $FR < 0.4$, *b-value* < 0.4 , DC proportion $< 65\%$, $D < 2.1$. Achievement of this combination was recorded 3–10 seconds before macroscopic failure in all experiments regardless of the sandstone type. Using the criterion for any single parameter separately leads to false positives.

The results of this study, combined with the analysis of data from other researchers, allow us to conclude that the triggered activation of fault zones in sandstones under weak cyclic stresses follows a universal scenario, independent of the rock's microstructural features.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ ТРЕЩИН ГИДРОРАЗРЫВА В УСЛОВИЯХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ ПРОДУКТИВНОГО ПЛАСТА

Н. А. Юдочкин*, А. А. Таирова, Г. В. Беляков

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: rood818181@gmail.com*

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения эффективности гидроразрыва пласта (ГРП) в условиях тонкослоистых коллекторов, где традиционные подходы к моделированию распространения трещин могут давать существенные погрешности. В практике нефтедобычи всё чаще встречаются залежи с мощностью продуктивного пласта менее 10 метров, характеризующиеся чередованием песчаников, алевролитов и аргиллитов. Это создаёт специфические условия для развития трещин ГРП, требующие детального изучения.

Научная новизна исследования заключается в анализе распространения вертикальных трещин в условиях малых мощностей продуктивных пластов. В значительной доле научных работ акцентируется внимание на образовании и распространении трещин с граничными условиями более 20 метров в высоту [1], однако продуктивный пласт может иметь суммарную мощность менее 10 метров, в которых чередуются песчаники, алевролиты и аргиллиты [2]. В работе [3] отмечено, что при раскрытии профиль образующейся трещины зависит от напряжений в слое. Согласно исследованиям [4], распространению трещины сквозь слои могут препятствовать большая разность напряжений вдоль пласта кровли, меньший модуль Юнга и больший коэффициент Пуассона породы.

В рамках данной работы будет проведено исследование развития вертикальной трещины на примере физического эксперимента. Эксперимент позволит уточнить закономерности распространения трещин в слоистых средах малой мощности и оценить влияние механических свойств пород на геометрию трещины. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования моделей ГРП в сложных геологических условиях.

Литература

1. Aboozar G., Mikhaliovich P.V. Hydraulic fracture optimization by using a modified Pseudo-3D model in multi-layered reservoirs // *Journal of Natural Gas Geoscience*. 2018. [https:// doi.org/10.1016/j.jnggs.2018.08.004](https://doi.org/10.1016/j.jnggs.2018.08.004)
2. Трушкова Л.Я., Ларичев А.И., Скачек К.Г., Бостриков О.И., Гриценко С.А., Ганин А.В., Михайлов С.А., Сергеев Д.А. Геологическое строение и условия формирования неокотских резервуаров Юго-Западного поднятия Южно-Ягунского месторождений // *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. 2008. Т. 3. № 2.
3. Linkov A.M., Markov N.S. Improved pseudo three-dimensional model for hydraulic fractures under stress contrast // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2020. Vol. 130. P. 104316. [https:// doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104316](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104316)
4. Zhao L., Zhang A., Wu G., Chen Z., Liu W., Wang J. Study on the Vertical Propagation Behavior of Hydraulic Fractures in Thin Interbedded Tight Sandstone // *Processes*. 2024. Vol. 12. P. 2375. [https:// doi.org/10.3390/pr12112375](https://doi.org/10.3390/pr12112375)

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012100531-7).

EXPERIMENTAL STUDY OF THE GEOMETRY OF HYDRAULIC FRACTURING CRACKS UNDER LOW-CAPACITY CONDITIONS OF A PRODUCTIVE RESERVOIR

N. A. Yudochkin, A. A. Tairova, G. V. Belyakov

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

** E-mail: rood818181@gmail.com*

The relevance of the work is due to the need to increase the efficiency of hydraulic fracturing in thin-layer reservoirs, where traditional approaches to modeling crack propagation can produce significant errors. In the practice of oil production, deposits with a productive reservoir capacity of less than 10 meters are increasingly found, characterized by alternating sandstones, siltstones and mudstones. This creates specific conditions for the development of fracturing fractures that require detailed study.

The scientific novelty of the study is the analysis of the propagation of vertical cracks in conditions of low capacity of productive formations. A significant proportion of scientific papers focus on the formation and propagation of cracks with boundary conditions of more than 20 meters in height, however, a productive reservoir may have a total thickness of less than 10 meters, in which sandstones, siltstones and mudstones alternate. It was noted in that when opening, the profile of the resulting crack depends on the stresses in the layer. According to research, the propagation of cracks through the layers may be hindered by a large stress difference along the roof layer, a smaller Young's modulus and a larger Poisson's ratio of the rock.

Within the framework of this work, a study of the development of a vertical crack using the example of a physical experiment will be conducted. The experiment will make it possible to clarify the patterns of crack propagation in low-power layered media and evaluate the influence of the mechanical properties of rocks on the crack geometry. The results obtained can be used to improve hydraulic fracturing models in difficult geological conditions.

ФАЗОВЫЕ И АМПЛИТУДНЫЕ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ДЛИННОПЕРИОДНЫМИ ГЕОМАГНИТНЫМИ ПУЛЬСАЦИЯМИ И ВАРИАЦИЯМИ ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ

Н. В. Ягова^{1,*}, Я. А. Сахаров², Е. Н. Федоров¹, В. Н. Селиванов³

¹Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

²Полярный геофизический институт (ПГИ), Апатиты, Россия

³Центр физико-технических проблем энергетики Севера – филиал Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ЦЭС КНЦ РАН), Апатиты, Россия

*E-mail: nyagova@yandex.ru

Отношение амплитуды вариаций геоиндуцированных токов (ГИТ) к амплитуде вызывающих их геомагнитных пульсаций (ГИТ-эффективность пульсаций) зависит от ряда факторов, включая пространственное распределение земной проводимости и нагрузки электрической сети. Другая группа параметров относится к геомагнитным пульсациям и включает их поляризацию и пространственное распределение амплитуды и фазы. В зависимости от спектрального состава и пространственного масштаба пульсаций ГИТ-эффективность пульсаций может отличаться в несколько раз [1–3]. Отношение амплитуд и разность фаз между вариациями ГИТ и пульсациями может использоваться как дополнительный инструмент диагностики параметров системы магнитосфера-ионосфера и проводимости земной коры. В работе рассматривается чувствительность этих параметров к используемым модельным и реальным схемам расположения станций. Исследуются пульсации в частотном диапазоне от единиц до десятков миллигерц ($Pc4-6/Pi2-3$) на авроральных и субавроральных станциях сети измерений ГИТ [4–5] и магнитометров сети IMAGE. Рассматриваются когерентные с геомагнитными пульсациями вариации ГИТ, для которых надпороговое значение спектральной когерентности сохраняется на участке меридионального профиля, включающего по крайней мере три станции. Для отобранных пульсаций оценивается влияние распределения фазы геомагнитных пульсаций на ГИТ в зависимости от положения станции концевых и средних точках линии электропередач.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН, ПГИ и ЦЭС КНЦ РАН.

Литература

1. Сахаров Я.А., Ягова Н.В., Пилипенко В.А. Геомагнитные пульсации $Pc5/Pi3$ и геоиндуцированные токи // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. С. 445–450. <https://doi.org/10.31857/s0367676521030236>
2. Sakharov Ya.A., Yagova N.V., Pilipenko V.A., Selivanov V.N. Spectral content of $Pc5-6/Pi3$ geomagnetic pulsations and their efficiency in generation of geomagnetically induced currents // Russ. J. Earth. Sci. 2022. Vol. 22. P. ES1002. <https://doi.org/10.2205/2021ES000785>.
3. Yagova N.V., Pilipenko V.A., Sakharov Ya.A. et al. Spatial scale of geomagnetic $Pc5/Pi3$ pulsations as a factor of their efficiency in generation of geomagnetically induced currents // Earth Planets Space. 2021. Vol. 73. Art. No. 88. <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01407-2>
4. Баранник М.Б., Данилин А.Н., Каткалов Ю.В. и др. Система регистрации геоиндуцированных токов в нейтралах силовых автотрансформаторов // Приборы и техника эксперимента. 2012. № 1. С. 118–123.
5. Селиванов В.Н., Аксенович Т.В., Билин В.А. и др. База данных геоиндуцированных токов в магистральной электрической сети «Северный транзит» // Солнечно-земная физика. 2023. Т. 9. № 3. С. 100–110. <https://doi.org/10.12737/szf93202311>.

PHASE AND AMPLITUDE RELATIONS BETWEEN LONG-PERIOD GEOMAGNETIC PULSATIONS AND VARIATIONS OF GEOMAGNETICALLY INDUCED CURRENTS

N. V. Yagova^{1,*}, Y. A. Sakharov², E. N. Fedorov¹, V. N. Selivanov³

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

²*Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia*

³*Center for Physical and Technical Problems of Northern Energy, Kola Science Center Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia*

*E-mail: nyagova@yandex.ru

Amplitude ratio of geomagnetically induced currents (GICs) to the source geomagnetic pulsations (GIC-efficiency of pulsations) depends on several factors including spatial distribution of Earth conductivity, loading of the electric network. The other group of parameters is related to geomagnetic pulsations and includes their polarization and spatial distribution of the amplitude and phase. The pulsation's GIC-efficiency can differ at several times in dependence on spectral content and spatial scale of pulsations. Amplitude ratio and phase difference between geomagnetic pulsations and GIC variations can be used as an additional instrument for diagnostics of the magnetosphere-ionosphere system and Earth's crust conductivity. In the present study, sensitivity of these parameters to model and real locations of stations is analyzed. The pulsations in frequency range from several mHz to tens of mHz (Pc4-6/Pi2-3) at auroral and subauroral stations of the network of GIC registration and IMAGE magnetometer network are studied. The coherent with magnetic pulsations variations of GIC are considered if over-threshold coherence is found for a segment of the profile including at least three stations. For these pulsations, influence of phase distribution of geomagnetic pulsations on their GIC efficiency is analyzed in dependence on station location at the end or in the middle of the electric line

ВОРКШОП
"МЕТОДЫ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ
В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ
СВЕТОВЫМИ ПУЧКАМИ"

ИЗМЕРЕНИЕ И КОМПЕНСАЦИЯ СРЕДНЕГО НАКЛОНА ВОЛНОВОГО ФРОНТА

Г. В. Башкатов*, И. В. Животовский, В. Е. Карасик, А. А. Сахаров

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

**E-mail: bashkatov@bmstu.ru*

Известно, что при распространении в атмосфере излучение подвергается искажениям, что приводит к ухудшению характеристик астрономических телескопов и открытых оптических линий связи. Оптические параметры атмосферы, позволяющие оценить влияние её состояния на работу этих систем, обладают высокой пространственно-временной изменчивостью и имеют стохастический характер. Для уточнения существующих моделей взаимодействия атмосферы и оптического излучения необходим значительный массив экспериментальных данных.

Для решения этой задачи применяют датчики волнового фронта (например, датчики Шака–Гартмана или датчики кривизны). Следует отметить, что таким датчикам для проведения измерений необходим источник опорного сигнала, несущий информацию об атмосферной турбулентности. В некоторых случаях его можно реализовать с помощью отраженного от уголкового световозвращателя излучения. Идеальный световозвращатель обращает направление распространения пучка вдоль его оптической оси и производит центрально-симметричное преобразование распределения поля пучка в плоскости падения относительно своей вершины. Данный факт, вместе с принципом взаимности распространения излучения, позволяет заключить о возможности полной компенсации среднего наклона волнового фронта при двукратном прохождении пучка (с последовательным прямым и обратным ходом), что делает его измерение невозможным. Указанный эффект хорошо известен при работе с лазерными опорными звёздами, однако физическая природа явления в данном случае иная.

В рамках исследования проведено математическое моделирование распространения излучения в неоднородной атмосфере, приводящей к возникновению наклона волнового фронта при различных диаметрах пучка и световозвращателя. Показано, что дифракция на апертурах передающей системы и световозвращателя обуславливает появление чувствительности датчика к среднему наклону волнового фронта, причем степень этой чувствительности определяется размерами апертур. Приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие возможность измерения среднего наклона волнового фронта.

MEASUREMENT AND CORRECTION OF THE GLOBAL WAVEFRONT TILT

G. V. Bashkatov*, I. V. Zhivotovsky, V. E. Karasik, A. A. Sakharov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

**E-mail: bashkatov@bmstu.ru*

Atmospheric propagation introduces distortions in optical beams, degrading the performance of astronomical telescopes and free-space optical links. The atmospheric optical parameters, which determine the extent of this impact, are highly variable in both space and time and exhibit stochastic behavior. Accurate modeling of the interaction between optical radiation and the atmosphere therefore requires extensive experimental datasets.

Wavefront sensors, such as Shack–Hartmann or curvature sensors, are commonly employed to address this challenge. These sensors, however, require a reference source that carries information about atmospheric turbulence in order to provide meaningful measurements. In some implementations, this reference can be realized using radiation reflected from a corner-cube retroreflector

An ideal retroreflector returns the beam along its incoming axis and performs a centrally symmetric transformation of the transverse field distribution relative to its vertex. When combined with the principle of reciprocity, this property implies that the global wavefront tilt can be completely compensated during double-pass propagation (forward and backward), rendering its direct measurement impossible. While similar

phenomenon is well documented in the context of laser guide stars, its underlying physical mechanism differs in the present scenario.

In this study, we perform numerical simulations of beam propagation through a nonuniform atmosphere, which induces wavefront tilt depending on the diameters of the beam and the retroreflector. Diffraction at the apertures of both the transmitting system and the retroreflector generates sensor sensitivity to the global wavefront tilt, with the degree of sensitivity determined by the aperture sizes. Experimental results confirm that the global wavefront tilt can be measured under these conditions.

ПЕРЕНОС ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРУ В КОСМОС ПРИ НАЛИЧИИ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОБЛАКОВ

В. П. Бусыгин, И. Ю. Кузьмина*

Акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения»,
Москва, Россия

*E-mail: irkuzmina@bk.ru

Одним из ведущих предприятий Роскосмоса по разработке и производству лазерных систем различного назначения, в том числе, систем лазерной спутниковой дальнометрии и высокоскоростной лазерной связи, является научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения» (АО «НПК «СПП»). Лазерные системы в спутниковой дальнометрии, космической геодезии и навигации – это, прежде всего, более высокая точность измерений. Недостатком используемых лазерных систем является зависимость их производительности от метеоусловий, в частности, от наличия облаков между наземным пунктом и космическим аппаратом (КА). Однако в экспериментах, проведенных в АО «НПК «СПП», наблюдались отдельные успешные сеансы спутниковой лазерной дальнометрии в условиях облачности [1, 2].

Проведено теоретическое исследование возможности функционирования лазерных станций при наличии определенных форм облаков, применительно к характеристикам наземного и бортового блоков беззапросной лазерной дальнометрии. Процесс распространения лазерного излучения в атмосфере при наличии слоистообразных облаков верхнего и среднего ярусов моделировался с помощью локальной оценки метода Монте-Карло [3]. Использованы математические модели молекулярно-аэрозольной атмосферы для длины волны 0.532 мкм, с включением оптических характеристик кристаллической среды для агрегатных структур ледяных частиц [4, 5]. Выполнены расчеты переноса субнаносекундных лазерных импульсов наземных станций на высокоорбитальные и низкоорбитальные КА. Получены коэффициенты ослабления прямого и рассеянного излучений, импульсные характеристики трасс распространения излучения и оптические сигналы на борту КА. Изучено влияние параметров кристаллических облаков на пространственно-временные и энергетические характеристики прямого и рассеянного компонентов лазерного излучения на входе приемной бортовой аппаратуры при различных углах расходимости исходного импульса и визирования на КА [5, 6].

Таким образом, принципы беззапросной лазерной дальнометрии могут быть реализованы при наличии на небосводе перистых форм облаков верхнего яруса, а также высокослоистых облаков среднего яруса с установленными ограничениями по оптической толщине. Полученные результаты подтверждают возможность повышения технологической производительности систем высокоточной спутниковой дальнометрии, так как повторяемость рассматриваемых форм облаков над территорией РФ составляет более 20%. Результаты также могут быть применены к лазерно-связным системам с учетом характеристик лазерных терминалов связи.

Литература

1. Садовников М.А., Сумерин В.В., Шаргородский В.Д. Односторонняя лазерная дальнометрия и ее применение в задачах повышения точности частотно-временного обеспечения ГЛОНАСС // International Technical Workshop WPLTN-2012. Санкт-Петербург. Россия. 2012.
2. Жабин А.С., Набокин П.И. Методы достижения субнаносекундной точности измерений интервалов времени в бортовом терминале односторонней лазерной дальнометрической системы // Электромагнитные волны и электронные системы. 2013. Т. 18. С. 39–42.
3. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике / Под ред. Марчука Г.И. – Новосибирск : Наука. 1976. – 284 с.
4. Baum B., Yang P., Heymsfield A., Bansemer A., Cole B., Merrelli A., Schmitt C., Wang Chenxi. Ice cloud single-scattering property models with the full phase matrix at wavelengths from 0.2 to 100 mm // Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. 2014. Vol. 146. P. 123–139.
5. Бусыгин В.П., Гинзбург А.С., Кузьмина И.Ю. Распространение лазерных импульсов через атмосферу в космос при наличии облаков верхнего и среднего ярусов // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 6, С. 680–692.
6. Бусыгин В.П., Кузьмина И.Ю. Пропускание лазерного излучения кристаллическими облаками на трассах «земля – космос» // Оптика атмосферы и океана. 2024. Т. 37. № 2. С. 176–183

TRANSFER OF LASER RADIATION THROUGH THE ATMOSPHERE INTO SPACE IN THE PRESENCE OF ICE-CRYSTAL CLOUDS

V. P. Busygin, I. Yu. Kuzmina*

Joint-stock company Research and Production Corporation Precision Systems and Instruments, Moscow, Russia

**E-mail: irkuzmina@bk.ru*

Laser systems in satellite rangefinder, space geodesy and navigation are, first of all, a higher accuracy of measurements. The disadvantage of the laser systems used is that their performance depends on weather conditions, particularly the presence of clouds between the ground station and the spacecraft. However, in experiments conducted at JSC RPC PSI, there were some successful sessions of satellite laser rangefinder in cloudy conditions.

Therefore, a theoretical study was conducted on the possibility of functioning of laser stations in the presence of certain forms of clouds, in relation to the characteristics of the ground-based and airborne units of non-request laser rangefinder. The process of propagation of laser radiation in the conditions of the molecular-aerosol optical model of the atmosphere in the presence of clouds of the upper and middle tiers was simulated using the local assessment of the Monte Carlo method. Mathematical models of the atmosphere were used for a laser wavelength of $0.532\ \mu\text{m}$, with the inclusion of the optical characteristics of the crystalline medium for the aggregate structures of ice particles. Calculations were performed for the transfer of optical radiation from sub-nanosecond laser pulses from ground-based stations to high- and low-orbit spacecraft. The coefficient of attenuation of direct and scattered radiation, the pulse characteristics of the radiation propagation paths, and the optical signals on board the spacecraft were obtained. The influence of the parameters of the upper and middle tiers of ice-crystal clouds on the spatial-temporal and energy characteristics of the direct and scattered components of laser radiation at the input of the receiving onboard equipment at various angle of divergence of the initial pulse γ and zenith angle of the spacecraft ν has been studied.

Thus, the principles of non-request laser rangefinder can be implemented in the presence of cirrus, cirrostratus and cirrocumulus clouds of the upper tier on the firmament, as well as altostratus clouds of the middle tier with established restrictions on the optical thickness and the zenith angle. The presented results confirm the possibility of increasing the technological performance of high-precision satellite rangefinder systems, as the repeatability of the considered cloud forms over the territory of the Russian Federation is 20% or more. The results can also be applied to laser space communication systems, taking into account the characteristics of laser communication terminals.

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭОП В АДАПТИВНЫХ СИСТЕМАХ

В. Е. Карасик*, Г. В. Башкатов, И. В. Животовский, А. А. Сахаров

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

**E-mail: karassik@bmstu.ru*

Используемые во многих адаптивных оптических системах (АОС) (в силу простоты решения и относительной дешевизны изготовления) датчик волнового фронта (ДВФ) типа Шака-Гартмана, уменьшает весь проходящий световой поток на величину, пропорциональную количеству элементов его микролинзового раstra, что приводит к сокращению дальности работы таких систем.

В этой связи для повышения соотношения сигнал/шум на выходе АОС стараются либо увеличить апертуру ОС, либо использовать фотоприемные устройства с повышенной чувствительностью. Первый способ приводит к неоправданному увеличению габаритов, стоимости и сроков производства (поскольку изготовление оптических элементов большого диаметра занимает длительное время) и больше подходит для стационарных систем, чем для мобильных. Второй способ, при котором выбирается высокочувствительная видеокамера часто применяется в астрономических системах, однако такие видеокамеры, как правило, являются низкоскоростными, что совершенно неприемлемо для большинства АОС. Поэтому для АОС, работающих на горизонтальных трассах, наиболее предпочтительно использование усилителя яркости на основе электронно-оптического преобразователя (ЭОП). Светоэнергетический расчет для ЭОП с коэффициентом усиления яркости 10^4 показывает, что при его использовании существенно возрастает соотношение сигнал/шум на ДВФ.

Созданный датчик волнового фронта на основе ЭОП показал, что при одинаковом световом потоке на обычной камере и на ДВФ с растром 30×30 яркость пятен в каждом элементе раstra и на одиночной камере практически не отличаются. С учетом количества элементов раstra, равным 900, между которыми делится исходный световой поток, можно говорить, что выигрыш при использовании ЭОП составил около 10^3 .

Таким образом, использование ЭОП в составе ДВФ типа Шака-Гартмана для АОС позволяет существенно повысить чувствительность, а, следовательно, и дальность работы таких систем.

USING EOC IN ADAPTIVE SYSTEMS

V. E. Karasik*, G. V. Bashkatov, I. V. Zivotovskii, A. A. Sakharov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

**E-mail: karassik@bmstu.ru*

The Shack-Hartmann type wavefront sensor (WFS) used in many adaptive optical systems (AOS) (due to the simplicity of the solution and relative cheapness of manufacture) reduces the entire incoming luminous flux by an amount proportional to the number of elements of its microlensing raster, which reduces the range of operation of such systems.

In this regard, to increase the signal-to-noise ratio at the AOS output, they try to either increase the OS aperture or use photodetectors with increased sensitivity. The first method leads to an unjustified increase in size, cost and production time (since the manufacture of large-diameter optical elements takes a long time) and is more suitable for stationary systems than for mobile ones. The second method, in which a highly sensitive video camera is selected, is often used in astronomical systems, however, such video cameras are usually low-speed, which is completely unacceptable for most AOS. Therefore, for AOS operating on horizontal routes, it is most preferable to use an image intensifier, based on an electron-optical converter (EOC). The light-energy calculation for EOC with a brightness gain factor of about 10^4 shows that when using it, the signal-to-noise ratio on the WFS increases significantly

Created on the basis of EOC, it showed that with the same luminous flux on a conventional camera and on a WFS with a 30x30 raster, the brightness of the spots in each element of the raster and on a single camera practically do not differ. Taking into account the number of raster elements equal to 900, between which the initial luminous flux is divided, we can say that the gain when using EOP was about 10^3 .

Thus, the use of EOC as part of a Shack-Hartmann type WFS for AOS makes it possible to significantly increase the sensitivity and, consequently, the range of operation of such systems.

ГИБКИЕ МАТРИЧНЫЕ МЭМС-ЗЕРКАЛА ДЛЯ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ

Д. В. Козлов*, И. П. Смирнов

АО «Российские космические системы», Москва, Россия

*E-mail: risc3@mail.ru

В современных оптических системах формирования изображений широко применяются системы адаптивной оптики, позволяющие качественно влиять на визуальную чёткость и точность регистрируемых данных. Ключевым элементом таких систем является отражающая поверхность, способная изменять свою форму – так называемые деформируемые зеркала (ДЗ) – благодаря им волновой фронт излучения корректируется, нивелируя искажения атмосферы, оптических элементов и других возмущающих факторов. В зависимости от конкретного применения ДЗ могут быть выполнены на основе актюаторов различной физической природы: пьезоэлектрические, электротермические, электромагнитные, электростатические и пр. Наиболее распространёнными являются пьезоэлектрические зеркала ввиду их универсальности и масштабируемости под различные размеры поверхности. Однако для случаев, когда критичны минимальный отклик, размеры, энергопотребление и максимальная плотность, количество управляемых элементов, наилучшим образом подходят электростатические устройства. Такие ДЗ изготавливают по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС), используя классические производственные линейки полупроводниковых приборов, с той лишь особенностью, что процессы изготовления носят скорее объёмный характер обработки пластин-заготовок, чем поверхностный. За рубежом подобные изделия выпускают уже больше 20 лет такие фирмы, как Boston Micromachines и Iris АО (США) [1, 2]. На отечественном рынке серийная реализация данной технологии отсутствует. При этом, помимо устройств адаптивной оптики, возможные сферы применения подобных изделий включают телекоммуникационное оборудование (переключатели, коммутаторы, элементы фазированных решеток), системы многолучевой записи информации, а также научные и медицинские аналитические приборы (спектроскопия, цитометрия и пр.).

В рамках работ по созданию системы адаптивной оптики для наземного телескопа в диапазоне длин волн 0.5–0.95 мкм нами был разработан технологический образец матричных электростатически управляемых зеркал с изменяемой кривизной поверхности, 25 локальными зонами управления размером 0.45 мм каждая. Изготовление таких зеркал основано на «жертвенной» технологии обработки кремниевых пластин с относительно не высоким требованием к топологической норме (не хуже 1.5 мкм), что позволяет применить данный процесс на многих отечественных предприятиях. В качестве материала «жертвенного» слоя (технологический материал, формируемый в зазоре под зеркальной поверхностью и удаляемый в ходе изготовления устройства) выбран оксид кремния, легированный фосфором (ФСС). Зеркальная поверхность представляет собой тонкий слой поликремния (3 мкм) с нанесённым на него отражающим покрытием алюминия и защитным слоем оксида кремния.

Изготовленные образцы в результате тестирования показали возможность управления кривизной отражающей поверхности; вертикальная деформация локальных зон достигала 1.78 мкм при управляющем напряжении, не превышающем 119 В. По результатам работы сформулированы приоритетные направления исследований, а именно: увеличение размера матрицы микрозеркал до 12×12 , увеличение вертикальной деформации до 3.5–5 мкм, снижение шероховатости отражающей поверхности до значений среднего арифметического отклонения профиля ниже 15 нм, разработка варианта сегментированных матриц микрозеркал, а также расширение рабочего диапазона длин волн.

Литература

1. Zhou Y., Bifano T. Characterization of contour shapes achievable with a MEMS deformable Mirror, Manufacturing Engineering Department, Boston University // SPIE. 2006. Vol. 6113. P. 123–130.
2. Zamkotsian F., Lanzoni P., Barette R., Helmbrecht M., Marchis F. and Teichman A. Operation of a MOEMS Deformable Mirror in Cryo: Challenges and Results // Micromachines. 2017. Vol. 8. P. 233. [https:// doi.org/10.3390/mi8080233](https://doi.org/10.3390/mi8080233)

MATRIX MEMS DEFORMABLE MIRRORS FOR ADAPTIVE OPTICS

D.V. Kozlov*, I. P. Smirnov

JSC «Russian Space Systems», Moscow, Russia

**E-mail: risc3@mail.ru*

In modern optical imaging systems, adaptive optics systems are widely used, enabling a significant improvement in visual clarity and the accuracy of recorded data. A key element of such systems is a reflective surface capable of changing its shape, called deformable mirrors (DMs). Thanks to these mirrors, the wavefront of radiation is corrected, compensating for atmospheric distortions, optical element imperfections, and other perturbing factors. Depending on the specific application, DMs can be based on actuators of various physics: piezoelectric, electrothermal, electromagnetic, electrostatic, etc. The most common are piezoelectric mirrors due to their versatility and scalability to different surface sizes. However, for applications where minimal response time, compact size, low power consumption, and maximum density and number of controllable elements are critical, electrostatic devices are best suited. Such DMs are fabricated using microelectromechanical system (MEMS) technology, employing standard semiconductor manufacturing lines, fabrication processes are more bulk micromachining of wafers than surface micromachining. Such products have been manufactured for over 20 years by Boston Micromachines and Iris AO (USA). In the Russia, serial implementation of this technology is absent. Moreover, beyond adaptive optics devices, potential application areas for such products include telecommunications equipment (switches, routers, phased array elements), multi-channel data recording systems, and scientific and medical analytical instruments (spectroscopy, cytometry, etc.)

As part of the work to develop an adaptive optics system for a ground-based telescope in the wavelength range of 0.5–0.95 μm , we have designed a technological prototype of electrostatically controlled matrix mirror with variable surface curvature, featuring 25 local control zones, 0.45 mm in size. The fabrication of such mirrors is based on a sacrificial-layer technology for processing silicon wafers with a relatively low topological linewidth requirement (no worse than 1.5 μm), allowing this process to be implemented at many Russia manufacturing facilities. Phosphorus-doped silicon oxide (PSG) was chosen as the sacrificial layer material (a technological material formed in the gap beneath the mirror surface and removed during device fabrication). The mirror surface consists of a thin layer of polysilicon (3 μm) coated with an aluminum reflective layer and a protective silicon oxide layer.

Testing of the fabricated prototypes demonstrated the ability to control the curvature of the reflective surface, with vertical deformation of local zones reaching 1.78 μm at a control voltage not exceeding 119 V.

Based on the results of this work, priority research directions have been identified, specifically: increasing the micro-mirror array size to 12×12 , increasing vertical deformation to 3.5–5 μm , reducing reflective surface roughness to an arithmetic mean deviation of the profile below 15 nm, developing a segmented micro-mirror array design, and expanding the operational wavelength range.

**ТЕОРИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ ДЛЯ ФАЗОВЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ,
РАСПРОСТРАНЯЮЩЕЙСЯ В ТУРБУЛЕНТНОЙ СРЕДЕ**

И. В. Колоколов^{1,*}, В. В. Лебедев¹, Ф. А. Стариков², В. А. Богачев² и А. В. Немцева²

¹*Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау, Москва, Россия*

²*Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Россия*

**E-mail: igor.kolokolov@gmail.com*

Мы теоретически исследуем корреляционные функции фазы световой волны, распространяющейся в турбулентной среде. Мы используем уравнение для логарифма огибающей волнового пакета, которое включает нелинейный член второго порядка. Основываясь на этом уравнении, разрабатываем метод вычисления поправок к корреляционной функции, полученной в линейном приближении. Мы вычисляем первые поправки, определенные с помощью однопетлевых диаграмм, и находим их асимптотическое поведение. Было обнаружено, что на коротких расстояниях между точками первая поправка к парной корреляционной функции фазовых градиентов имеет такое же масштабирование, как и нулевое приближение, а на больших расстояниях первое приближение затухает быстрее, чем нулевое.

Таким образом, нет никаких оснований полагать, что коррекция разрушит нулевое приближение. С использованием свойств симметрии уравнения сделаны некоторые непertурбативные выводы. В частности, мы продемонстрировали, что мелкие детали изображения, получаемого оптической системой через атмосферу, размываются из-за турбулентных флуктуаций, и мы оценили максимальный размер этих деталей с точки зрения дисперсии Рытова. Эти результаты позволяют нам заключить, что условие применимости теории возмущений является малость дисперсии Рытова, и это условие выполняется равномерно на расстояниях между точками наблюдения. Относительная поправка на расстояниях, меньших или порядка радиуса первой зоны Френеля, имеет тот же порядок, что и дисперсия Рытова, в то время как на больших расстояниях относительная поправка намного меньше дисперсии Рытова. Следовательно, если единственный параметр (дисперсия Рытова) мал, то нулевое приближение может быть использовано для корреляционной функции фазовых градиентов на любом расстоянии.

**PERTURBATION THEORY FOR PHASE CORRELATIONS OF A LIGHT WAVE PROPAGATING
IN A TURBULENT MEDIUM**

I. V. Kolokolov^{1,*}, V. V. Lebedev¹, F. A. Starikov², V. A. Bogachev², A. V. Nemtceva²

¹*Landau Institute for Theoretical Physics Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Russian Federal Nuclear Center All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia*

**E-mail: igor.kolokolov@gmail.com*

We theoretically investigate the correlation functions of the phase of a light wave propagating through a turbulent medium. We use an equation for the logarithm of a wave packet envelope, which includes a second-order nonlinear term. Based on this equation, we develop a diagrammatic technique to calculate corrections to the correlation function obtained in the linear approximation. We calculate the first corrections determined by one-loop diagrams and find its asymptotic behaviors. We found that at short distances between points, the first correction to the pair correlation function of phase gradients has the same scaling behavior as the zero approximation, and at long distances, the first approximation decays faster than the zeroth one. Therefore, there is no evidence to suggest that the correction will destroy the zeroth approximation.

Some non-perturbative conclusions are made using the symmetry properties of the equation. We demonstrated that small details of an image received by an optical system through the atmosphere are smeared due to turbulent fluctuations, and we estimated the maximum size of these details in terms of the Rytov dispersion.

These results allow us to conclude that the applicability condition for the perturbation theory is the smallness of the Rytov dispersion, and this condition holds uniformly over the distances between observation points.

The relative correction at distances smaller or of the order of the radius of the first Fresnel zone is of the same order as the Rytov dispersion, while at larger distances, the relative correction is much smaller than the Rytov dispersion. Therefore, if the single parameter (the Rytov dispersion) is small, the zeroth approximation can be used for the correlation function of phase gradients at any distance.

ГИБРИДНЫЙ МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИСКАЖЕНИЙ ВОЛНОВОГО ФРОНТА НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

**А. В. Котов^{1,*}, Ю. А. Родимков², С. Е. Перевалов¹, К. Ф. Бурдонов¹,
И. Б. Мееров², А. А. Соловьев¹**

¹Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова–Грехова
Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия

²Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

*E-mail: kotov@ipfran.ru

Достижение максимальной пиковой интенсивности на мощных лазерных установках ограничено искажениями волнового фронта в пучке, и в частности, аберрациями неодинакового оптического пути, которые возникают между датчиком волнового фронта и фокусом пучка. Для компенсации данных аберраций требуется дополнительная калибровка адаптивной оптической системы, цель которой найти эталонный волновой фронт обеспечивающий наилучшую фокусировку. Традиционные методы калибровки требуют длительной многоитерационной оптимизации, чувствительной к начальным условиям. Развивающиеся в последние годы подходы на основе нейронных сетей обеспечивают высокую скорость, но часто демонстрируют недостаточную точность. В данной работе предлагается гибридный метод восстановления искажений волнового фронта, основанный на анализе фазово-разнесенных изображений в окрестности фокуса. Предложенный метод сочетает свёрточную нейронную сеть для предсказания начального приближения и алгоритм оптимизации для его уточнения. В эксперименте на лазерной установке PEARL при исходных искажениях волнового фронта со среднеквадратичным отклонением (СКО) от 0.15 до 0.6 длин волн разработанный метод обеспечил относительную ошибку восстановления менее 0.25. В результате в серии экспериментов фокусировка с числом Штреля порядка 0.95 достигалась за 2–4 итерации.

A HYBRID METHOD FOR WAVEFRONT DISTORTION RESTORATION BASED ON A NEURAL NETWORK

A. V. Kotov^{1,*}, Yu. A. Rodimkov², S. E. Perevalov¹, K. F. Burdonov¹, I. B. Meerov², A. A. Soloviev¹

¹Federal Research Center A. V. Gaponov–Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,
Nizhny Novgorod, Russia

²Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

*E-mail: kotov@ipfran.ru

Achieving maximum peak intensity in high-power laser systems is limited by wavefront distortions in the beam, particularly by unequal optical path aberrations that occur between the wavefront sensor and the beam focus. Compensating for these aberrations requires additional calibration of the adaptive optics system, the goal of which is to find a reference wavefront that provides optimal focusing. Traditional calibration methods require time-consuming, multi-iteration optimization that is sensitive to initial conditions. Neural network-based approaches developed in recent years offer high speed but often exhibit insufficient accuracy. This paper proposes a hybrid method for wavefront distortion reconstruction based on the analysis of phase-separated images in the vicinity of a focal point. The proposed method combines a convolutional neural network to predict an initial approximation and an optimization algorithm to refine it. In an experiment on the PEARL laser facility with initial wavefront distortions with a standard deviation from 0.15 to 0.6 wavelengths, the developed method achieved a relative reconstruction error of less than 0.25. As a result, focusing with a Strehl ratio of approximately 0.95 was achieved in 2–4 iterations in a series of experiments.

АДАПТИВНАЯ ОПТИКА В СОВРЕМЕННЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

А. В. Кудряшов*

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: kud@activeoptics.ru*

В докладе представлены основные направления современного применения адаптивных оптических систем.

1. Коррекция атмосферных фазовых флуктуаций.

- для систем оптической воздушной квантовой связи;
- системы передачи и фокусировки мощного лазерного излучения на большие расстояния (3–5–10 км) по горизонтальным и наклонным трассам (в том числе и подзарядка аккумуляторов дронов в городских условиях, а также дронов-разведчиков и т.д.);
- астрономические системы и телескопы: в России нет ни одного астрономического телескопа, с адаптивной оптической системой коррекции изображений;
- передача световой энергии на вертикальных трассах – задачи уничтожения космического мусора, подзарядки спутников на низких орбитах (порядка 150 км);
- задачи получения качественных изображений в условиях турбулентных сред.

2. Управление, формирование и коррекция аберраций в мощных лазерах.

- коррекция аберраций в Пета-Ваттных импульсных лазерных комплексах;
- компенсация наведённых термо деформаций в сверх мощных непрерывных лазерах;
- фазировка пучков мощных лазеров;
- формирование различных распределений интенсивности в технологических лазерных комплексах и управление заданными энергетическими характеристиками.

3. Медицинское применение адаптивной оптики.

4. Биологические исследования.

- получение изображений объектов исследований в конфокальной микроскопии;
- получение изображений различных объектов в биологически активных телах.

Необходимо отметить, что в настоящее время список применения адаптивных оптических систем постоянно расширяется. Так, на сегодня предложено использовать элементы адаптивной оптики в задачах сохранения и восстановления предметов исторического наследия, при очистке древних рукописей или скульптурных сооружений с применением твердотельных лазеров.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012400749-3).

ADAPTIVE OPTICS IN MODERN OPTICAL SYSTEMS

A. V. Kudryashov*

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

**E-mail: kud@activeoptics.ru*

This report presents the main areas of modern application of adaptive optical systems.

1. Correction of the atmospheric phase fluctuations.

- for optical free space quantum communication systems;
- systems for transmitting and focusing high-power laser radiation over long distances (3–5–10 km) along horizontal and inclined paths (including recharging drone batteries in urban environments, as well as reconnaissance drones, etc.);
- astronomical systems and telescopes: Russia does not have a single astronomical telescope with an adaptive optical image correction system;

- transmission of light energy along vertical paths – used for space debris removal and recharging satellites in low orbits (approximately 150 km);
- high-quality imaging in turbulent environments;

2. *Control, generation, and correction of aberrations in high-power lasers.*

- aberration correction in peta-watt pulsed laser systems;
- compensation for induced thermal deformations in ultra-high-power continuous-wave lasers;
- phasing of high-power laser beams;
- formation of various intensity distributions in industrial laser systems and control of specified energy characteristics.

3. *Medical applications of adaptive optics.*

4. *Biological research.*

- imaging of research objects using confocal microscopy;
- imaging of various objects in biologically active bodies.

It should be noted that the range of applications for adaptive optical systems is constantly expanding. Thus, it has been proposed to use adaptive optics elements in the preservation and restoration of historical heritage sites, and in the cleaning of ancient manuscripts or sculptural structures using solid-state lasers.

ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА УПРАВЛЯЮЩИХ ЭЛЕКТРОДОВ БИМОРФНОГО ДЕФОРМИРУЕМОГО ЗЕРКАЛА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОРРЕКЦИИ АТМОСФЕРНЫХ ИСКАЖЕНИЙ

П. М. Кузьмицкий*, Ю. В. Шелдакова

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: kuzmitsky@activeoptics.ru*

Современные оптические системы, функционирующие в реальных условиях, неизбежно сталкиваются с проблемой снижения качества сигнала из-за неоднородностей среды распространения, будь то атмосферная турбулентность, термические aberrации в лазерных установках или несовершенство самих оптических элементов. Данная задача решается методами адаптивной оптики, которые за счет активной коррекции волнового фронта минимизируют влияние случайных возмущений и повышают реальную эффективность приборов.

Ключевым элементом любой адаптивной оптической системы, ответственным за непосредственное устранение искажений световой волны, является фазовый корректор. Это устройство может быть реализовано на основе различных физических принципов и конструктивных решений, однако наиболее широкое применение на практике получило деформируемое зеркало, способное изгибаться, компенсируя искаженный волновой фронт.

Эффективность коррекции турбулентных искажений зеркалом напрямую зависит от его конструктивных параметров, среди которых ключевую роль играет количество управляющих элементов. С одной стороны, увеличение числа каналов управления расширяет диапазон воспроизводимых aberrаций и потенциально повышает качество коррекции. С другой – ведет к усложнению системы управления и росту стоимости конструкции. В связи с этим возникает актуальная задача определения оптимального количества управляющих элементов, обеспечивающих приемлемое качество коррекции при разумной конструктивной сложности зеркала.

В настоящей работе исследуется зависимость остаточной ошибки коррекции атмосферной турбулентности биморфным зеркалом с радиально угловой структурой электродов от числа управляющих элементов. Определяются оптимальные значения числа электродов, обеспечивающие необходимое значение параметра Штреля при различных уровнях турбулентности.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012400749-3).

INFLUENCE OF THE NUMBER OF CONTROL ELECTRODES OF A BIMORPH DEFORMABLE MIRROR ON THE EFFICIENCY OF ATMOSPHERIC DISTORTION CORRECTION

P. M. Kuzmitsky*, J. V. Sheldakova

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

**E-mail: kuzmitsky@activeoptics.ru*

Optical systems that operate in real-world environments often encounter signal degradation due to inhomogeneities in the propagation medium. These disturbances could be caused by atmospheric turbulence, thermal aberrations in laser active elements, or imperfections in the optical components themselves as well as their adjustments. Such issues could be solved by adaptive optics methods. The goal is to minimize the impact of random disturbances and significantly improve the actual performance of the devices by aberration compensation.

The key element of any adaptive optical system, responsible for the removal of the light wave distortions, is a phase corrector. This device can be implemented by using various physical principles and design solutions. However, the most widely used solution in practice is a deformable mirror, which can bend and thus compensate for the distorted wavefront.

The effectiveness of the turbulent distortion correction by a deformable mirror depends directly on its design parameters, especially the number of control element. On the one hand, increasing the number of control channels expands the range of correctable aberrations and potentially improves correction quality. On the other hand, it leads to a more complex control system and higher construction costs and reduced reliability. Therefore, the determination of the optimal number of control elements is a highly relevant task.

In the present work, the dependence of the residual error of atmospheric turbulence correction on the number of control elements is studied for a bimorph mirror with a radial-angular electrode structure. The optimal numbers of electrodes that ensure the required Strehl ratio at different turbulence levels are determined.

**СТАТИСТИКА ВЫСОКИХ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ СВЕТА, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ
В ТУРБУЛЕНТНОЙ СРЕДЕ**

В. В. Лебедев*

Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау, Москва, Россия

**E-mail: lwlebede@gmail.com*

Мы представляем исследование статистических свойств света, распространяющегося в турбулентной среде (атмосфере). Наше внимание сосредоточено на функции плотности вероятности интенсивности I для различных значений I и длины пути луча. Функция плотности вероятности $P(I)$ имеет два хвоста, характеризующихся растянутыми показателями, что указывает на вероятность редких событий с интенсивностью, намного превышающей типичное значение, значительно выше, чем можно было бы предположить по наивным гауссовым оценкам.

STATISTICS OF HIGH INTENSITY LIGHT, DISTRIBUTING IN TURBULENT MEDIA

V. V. Lebedev*

Landau Institute for Theoretical Physics Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: lwlebede@gmail.com*

We present the investigation of the statistical properties of light propagation in a turbulent fluid. Our focus is on the probability density function of the intensity I for different values of I and the beam's path length. The probability density function $P(I)$ exhibits two tails, characterized by stretched exponents, indicating that the likelihood of rare events with intensities much larger than the typical value is significantly higher than naive Gaussian estimates would suggest.

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ МЕТОДАМИ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ

П. Ц. Люй, А. Н. Никитин*

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: nikitin@activeoptics.ru*

Улучшение качества изображения для оптических систем наблюдения и идентификации возможно произвести путем как постобработки оптического сигнала для визуализации с потерей полезной информации, так и непосредственно воздействием на излучение, падающего на приемник. Для компенсации флуктуаций волнового фронта оптического излучения, которые могут возникать в результате турбулентных потоков и статистических погрешностей, используют разные способы коррекции, в частности, адаптивные оптико-электронные системы, которые представляют собой контур обратной связи.

В результате проведенного анализа научных источников было обнаружено, что на данный момент нет функционирующих адаптивных оптико-электронных систем изображающего типа, позволяющих выполнять коррекцию непосредственно по информации с распределения интенсивности изображения наблюдаемого объекта. В результате анализа принципов работы апертурного зондирования как метода, предполагающего возможность решения данного вопроса напрямую, была разработана экспериментальная установка для проведения исследований в лабораторных условиях.

Одним из важнейших параметров для правильного функционирования адаптивной оптической системы, работающей методом апертурного зондирования, является критерий оценки качества оптического изображения, от которого зависит корректность воздействия на излучение. В качестве критериев для анализа принципов работы выбраны следующие: критерии максимальной резкости, среднего межпиксельного контраста изображения, максимального межпиксельного контраста, критерий приведенной максимальной резкости. Они были внедрены в программу Close-Loop, обеспечивающую функционирование экспериментальной установки по пошаговому алгоритму.

В ходе проведенного эксперимента по выбранным критериям качества были зафиксированы их величины до коррекции без вносимых искажений, с внесенными искажениями и в ходе коррекции с течением времени. В качестве независимого оценочного параметра был выбран контраст изображения, определяемый у каждого штрихового элемента. Анализ полученных экспериментальных данных демонстрирует положительную тенденцию оптимизации, но также и неоднозначный результат применения предложенных критериев. Для дальнейших исследований рекомендуется выбор более подходящего источника излучения и объекта наблюдения для уменьшения влияния вторичных искажающих факторов и лучшей калибровки адаптивной оптико-электронной системы.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012400749-3).

OBJECT IMAGE QUALITY IMPROVEMENT IN ATMOSPHERIC TURBULENCE CONDITIONS USING ADAPTIVE OPTICS METHODS

P. Ts. Liui, A. N. Nikitin*

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

**E-mail: nikitin@activeoptics.ru*

Image quality improvement for optical surveillance and identification systems can be achieved by optical signal post-processing for visualization with useful information loss or by directly influencing the radiation falling to receiver. Various correction methods are used to compensate optical wavefront fluctuations as a result of turbulent flows and statistical errors, adaptive optical systems in particular

Analysis of scientific researches results in fact there are no functioning adaptive optical imaging systems that allow correction directly based on information from the intensity distribution of the observed object image at the present time. The experimental setup was developed for conducting research in laboratory conditions as a result of the analysis of the operating principles of hill-climbing method that suggests the possibility of solving this issue directly.

Optical image quality criterion is one of the most important parameters for the adaptive optical system correct functioning using the hill-climbing method. Correct action on radiation depends on it. The following criteria were selected for the operating principles analysis: the maximum sharpness criterion, the average interpixel contrast criterion of the image, the maximum interpixel contrast criterion, and the normalized maximum sharpness criterion. Each of them was implemented into the Close-Loop software for the experimental setup functioning according to step-by-step algorithm.

The values of the selected quality criteria were recorded at moments before correction without applied distortions, with distortions and during correction over time during the experiment. The image contrast determined for each line element was chosen as independent evaluation parameter. Analysis of the obtained experimental data demonstrates a positive trend of optimization but also an ambiguous result of proposed criteria applying. It is recommended to select more suitable light source and observation object to reduce the influence of secondary distorting factors and better calibrate the adaptive optical system for future research.

АТМОСФЕРА ГОРОДА И КВАНТОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КЛЮЧЕЙ

С. Ю. Поляков*, К. И. Приходько, С. Е. Широбакин

АО «Мостком», Рязань, Россия

*E-mail: s_pol@mостком.ru

Данная работа посвящена оценке влияния различных атмосферных явлений на параметры беспроводной оптической связи. Актуальность работы связана с определением возможности реализации технологии квантового распределения ключей (КРК) в открытых оптических каналах.

Построение беспроводного КРК осложняется спецификой городской среды. Сложный рельеф подстилающей поверхности формирует спорадическую динамику тропосферных процессов, приводящую к мелкомасштабной приземной турбулентности со сложной пространственно-временной структурой. Турбулентные искажения вызывают скинтилляции, расфокусировку пучка и флуктуации волнового фронта, существенно снижающие эффективность приема при вводе атмосферного излучения в оптическое волокно. Процессы носят динамический характер и сопровождаются изменением амплитудных потерь в канале распространения излучения вплоть до полной невозможности связи, причем любого, не только квантового типа. Для атмосферных каналов требуется решение комплексной задачи: статической оптимизации оптических систем (потери < 20–30 дБ на всей трассе) и динамической компенсации турбулентных искажений.

Измерения проводились на трассе длиной 3500 метров проложенной над плотной городской застройкой в течение 14 суток. Трасса проходила над жилыми домами, городским парком, малыми и крупными автодорогами, а также над железной дорогой. Такая подстилающая поверхность значительно отличается от условий распространения излучения над степью или водной поверхностью, т.к. имеет очаги резкого изменения турбулентности атмосферы.

Испытательное оборудование включало в себя два терминала оптической связи со световым диаметром 85 мм. Терминалы были оборудованы системами автоматической регулировки мощности и поддержания параллельности осей излучения информационного канала (ИНК 1550 нм, расходимость 0.15 мрад), служебным каналом наведения (СЛК 850 нм, расходимость 1 мрад). Одна точка располагалась на высоте 80 м, вторая – 30 м над уровнем земли. Фиксировались значения принимаемой мощности, уровня мощности передатчиков, показания координатора с обеих сторон с темпом 2 отсчета в секунду. Кроме того, было измерено значение уровня принимаемого сигнала ИНК в полосе 10 КГц с фиксацией результатов на осциллографе.

Обработка полученного массива данных позволило сделать вывод, что при использовании данного типа оборудования доступность канала КРК на трассе 3500 м не превышает 12.5% в день. Оценки показали, что при сокращении трассы до 2000 м доступность может возрасти до 66.4%. Еще большее значение доступности канала КРК в городских условиях возможно получить за счет применения систем адаптивной оптики.

Невозможно применить имеющуюся теорию турбулентности к конкретной городской среде (из частной беседы с директором Института теоретической физики им. Л. Д. Ландау член-корр. РАН И. В. Колоколовым).

URBAN ATMOSPHERE AND QUANTUM KEY DISTRIBUTION

S. Yu. Polyakov*, K. I. Prikhodko, S. E. Shirobakin

JSC «Mostkom», Ryazan, Russia

*E-mail: s_pol@mостком.ru

This paper assesses the impact of various atmospheric phenomena on wireless optical communication parameters. The relevance of this work lies in determining the feasibility of implementing quantum key distribution (QKD) technology in open optical channels.

The design of a wireless QKD is complicated by the specifics of the urban environment. The complex terrain of the underlying surface generates sporadic dynamics of tropospheric processes, leading to small-scale ground turbulence with a complex spatiotemporal structure. Turbulent distortions cause scintillations, beam defocusing, and wavefront fluctuations, significantly reducing reception efficiency when atmospheric radiation is introduced into an optical fiber. These processes are dynamic in nature and are accompanied by changes in amplitude losses in the radiation propagation channel, sometimes even completely preventing communication, including any type, not just quantum. Atmospheric channels require a complex solution: static optimization of optical systems (loss $< 20\text{--}30$ dB over the entire path) and dynamic compensation for turbulent distortions.

Measurements were conducted over a 3.500-meter path laid over a dense urban area for 14 days. The path passed over residential buildings, a city park, small and large highways, and a railway. This underlying surface differs significantly from the conditions of radiation propagation over steppe or water, as it contains areas of sharp changes in atmospheric turbulence.

The test equipment included two optical communication terminals with an 85 mm clear aperture. The terminals were equipped with an automatic power control system and a system for maintaining the parallelism of the radiation axes of the data channel (1550 nm ILC, 0.15 mrad divergence) and the service guidance channel (850 nm SLC, 1 mrad divergence). One point was located at an altitude of 80 meters, the second at an altitude of 30 meters above ground level. Received power, transmitter power levels, and coordinator readings were recorded at a rate of two samples per second on both sides. In addition, the received signal level of the INC was measured in a 10 kHz band, with the results recorded on an oscilloscope.

Processing the resulting dataset allowed us to conclude that, when using this type of equipment, the availability of the QKD channel over a 3.500-meter path does not exceed 12.5% per day. Estimates showed that by shortening the path to 2.000 meters, availability could increase to 66.4%. Even greater availability of the QKD channel in urban environments could be achieved through the use of adaptive optics systems.

It is impossible to apply existing turbulence theory to a specific urban environment (from a private conversation with Corresponding Member of RAS I. V. Kolokolov, Director of the Landau Institute of Theoretical Physics).

ОСОБЕННОСТИ КОРРЕКЦИИ НАКЛОНОВ В ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ В КОНТУРЕ УПРАВЛЕНИЯ ДАТЧИКА ВОЛНОВОГО ФРОНТА ШАКА-ГАРТМАНА

А. Л. Рукосуев*

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: alru@nightn.ru*

Рассматривается замкнутая система коррекции наклонов волнового фронта, состоящая из корректора наклонов, датчика Шака-Гартмана и системы управления, реализованной на персональном компьютере. Приходящий световой пучок попадает на корректор наклонов, затем отражается от него в направлении потребителя. Часть пучка с помощью светоделителя ответвляется на датчик Шака-Гартмана, который используется для измерения наклонов волнового фронта.

Датчик Шака-Гартмана в замкнутой системе может работать в двух режимах: в первом режиме контур управления замыкается непосредственно по смещениям фокальных пятен микролинзового массива (лензлета). Во втором – восстанавливается волновой фронт по полиномам Цернике; для замыкания контура управления используются первые два полинома, характеризующие наклоны волнового фронта по осям X и Y .

Работа замкнутой системы основана на использовании функций отклика корректора наклонов, которые измеряются перед запуском цикла коррекции путем подачи пробного напряжения поочередно на каналы X и Y и измерении соответствующих величин: для первого режима работы датчика это смещения фокальных пятен, для второго – значения первых двух полиномов Цернике.

Показано, что при использовании первого режима работы датчика и при наличии в волновом фронте светового излучения комы и комоподобных аберраций замкнутая система работает с ошибкой, определяемой уровнем данных аберраций. Во втором режиме работы датчика происходит разложение волнового фронта по полиномам Цернике, и кома не оказывает влияния на точность коррекции наклонов волнового фронта.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012400749-3).

FEATURES OF SLOPE CORRECTION IN A CLOSED SYSTEM WHEN USING A SHACK-HARTMANN WAVEFRONT SENSOR IN THE CONTROL LOOP

A. L. Rukosuev*

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

**E-mail: alru@nightn.ru*

A closed-loop system for correcting the slopes of the wavefront is considered. The system consists of a tip-tilt corrector, a Shack-Hartmann wavefront sensor and a control system implemented on a PC. The incoming light beam hits the tip-tilt corrector and is then reflected to the target direction. A part of the beam is branched off by a beamsplitter to a Shack-Hartmann sensor, which is used to measure the slopes of the wavefront.

The Shack-Hartmann sensor in a closed-loop system can operate in two modes: in the first mode, the control loop is closed directly by the displacements of the focal spots of the microlens array (lenslet). In the second mode, the wavefront is reconstructed using Zernike polynomials, and the first two polynomials characterizing the slopes of the wavefront along the X and Y axes are used to close the control loop.

The operation of a closed-loop system is based on the use of tip-tilt corrector response functions, which are measured before starting the correction cycle by applying a test voltage alternately to channels X and Y and measuring the corresponding values: for the first mode of sensor operation, these are the focal spot offsets, for the second mode, the values of the first two Zernike polynomials.

It is shown that when using the first mode of sensor operation and in the presence of coma and coma-like aberrations in the wavefront of light radiation, the closed-loop system operates with an error determined by the level of these aberrations. In the second mode of sensor operation, the wavefront decomposes according to Zernike polynomials, and the coma does not affect the precision of the wavefront slopes correction.

ШИРОКОАПЕРТУРНАЯ АДАПТИВНАЯ ОПТИКА ДЛЯ ПЕТАВАТТНЫХ ЛАЗЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ

В. В. Самаркин*

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: samarkin@akaoptics.com*

Адаптивная оптика способна улучшить фокусируемость пучка и коррекцию волнового фронта в мощных лазерных комплексах. Для 4 PW TiS лазера (CoReLS, Корея) было создано биморфное деформируемое (БДЗ) с диаметром 320 мм, включающее 127 биморфных электродов. Коррекцией БДЗ в фокусе параболы F300 мм было получено практически дифракционное фокальное пятно с размером меньше 2 мкм. Пиковая интенсивность в таком фокусе составила более 10^{23} Вт/см², что явилась рекордной на 2021 г.

Разработано комбинированное деформируемое зеркало (КДЗ) размером 410 × 470 мм, включающее 100 биморфных электродов и 20 пьезоактюаторов пакетного типа. Механической и автоматической регулировкой периферийными актюаторами, а затем коррекцией биморфными электродами на поверхности достигнута плоскостность 0.16 мкм (PV). Полученное качество поверхности показало коэффициент Штреля 0.86. Такое КДЗ используется в мишенной зоне для коррекции излучения FIREX (Япония): энергия в импульсе > 1 кДж, длительность импульса 3 нс, $\gamma = 1054$ нм.

В ходе изготовления и тестирования следующих 3-х таких КДЗ было обнаружено проявление пропечатывания границ биморфных пластин на отражающей поверхности. Проведены численные и экспериментальные исследования, предложены методы уменьшения неоднородностей в связи с проявлением пропечатывания границ. В результате фактор Штреля достигал значения более чем 0.92 для всех трех образцов. При установке КДЗ в оптический тракт во всех четырех каналах на лазере FIREX были получены фокальные пятна, близкие к дифракционным размерам.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012400749-3).

WIDE-APERTURE ADAPTIVE OPTICS FOR PETAWATT LASER COMPLEXES

V. V. Samarkin*

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

**E-mail: samarkin@akaoptics.com*

Adaptive optics can improve beam focusability and wavefront correction in high-power laser complexes. The bimorph deformable mirror (BDM) with a diameter of 320 mm, comprising 127 bimorph electrodes, was created for the 4 PW TiS laser at CoReLS in Korea. By correcting the BDM at the focus of a 300 mm parabola, near diffraction-limited focal spot smaller than 2 μ m was achieved. The peak intensity at this focus was over 10^{23} W/cm², which was record high for 2021.

The combined deformable mirror (CDM) 410 × 470 mm of size comprising 100 bimorph electrodes and 20 piezo stacked actuators was developed. The surface flatness of 0.16 μ m (PV) was achieved through mechanical and automatic adjustment of peripheral actuators, followed by correction with bimorph electrodes. The resulting surface quality demonstrated a Strehl ratio of 0.86. This CDM is used in the target zone for beam correction at FIREX (Japan) laser: pulse energy > 1 kJ, pulse duration 3 ns, $\lambda = 1054$ nm.

During the fabrication and testing of the next three such CDMs, imprinting of the bimorph plate boundaries (print-through) on the reflective surface was detected. Numerical and experimental studies were conducted, and methods for reducing inhomogeneities due to print-through were proposed. As a result, the Strehl ratio reached values greater than 0.92 for all three samples. When installing the CDMs in the optical paths of the FIREX laser, focal spots close to diffraction sizes were obtained in all four channels