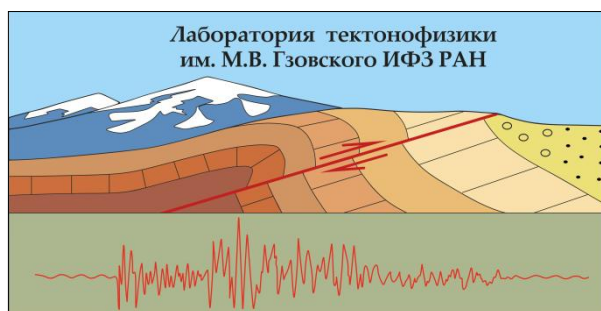


РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ОТДЕЛЕНИЕ НАУК О ЗЕМЛЕ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ ИМ. О. Ю. ШМИДТА РАН



Сборник аннотаций докладов участников

Шестой Всероссийской тектонофизической конференции,
приуроченной к 300-летию Российской академии наук

ТЕКТОНОФИЗИКА И АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ НАУК О ЗЕМЛЕ



7-12 октября 2024 г.,
Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН



г. Москва

Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. Аннотации докладов Шестой Всероссийской тектонофизической конференции, приуроченной к 300-летию Российской академии наук. – М.: ИФЗ РАН, 2024. – 124 с.

В сборнике публикуются аннотации докладов участников Шестой Всероссийской тектонофизической конференции «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле», которая в этом году приурочена к 300-летию Российской академии наук. В сборнике представлены краткие сообщения научных исследований по теоретическим вопросам тектонофизики и результатам изучения корового напряженно-деформированного состояния, современным проблемам геодинамики и строения земной коры, проблемам прогноза сейсмических и геологических опасностей и роли тектонофизики в их решении, а также по использованию методов тектонофизики в поисковой геологии.

Ответственный редактор:
доктор физ.-мат. наук Ю.Л. Ребецкий

Редактор
кандидат геол.-мин. наук Е.А. Мануилова

ОГЛАВЛЕНИЕ

Определение напряженно-деформированного состояния массива пород по данным измерений смещений на ограниченном по площади участке поверхности. Теория и эксперимент.....	10
<i>Абдулин И. М., Белоусова О. Е., Городилов Л. В., Рублев Д. Е., Степанов Д. В.</i>	
Сравнительный анализ гидрогеологических аномалий Кеминского катастрофического землетрясения 1911 г. в Средней Азии и Шемахинского землетрясения 1902 г. на Кавказе (в связи с проблемой прогнозирования сильных землетрясений)	11
<i>Абдуллаев А. У</i>	
Генетическая связь развития очагов современных гидротермальных систем Тянь-Шаня с сейсмической активностью	12
<i>Абдуллаев А. У.</i>	
Парадокс сейсмического микрорайонирования и о сейсмотектонике северного побережья озера Иссык-Куль.....	13
<i>Алешин А. С.</i>	
Оценка внутреннего поглощения и рассеяния и их вклад в общее затухание для территории Алтае-Саянской складчатой области	14
<i>Арапов В. В.</i>	
Структурный фактор локализации месторождений меди в Баимской рудной зоне: результаты аналогового моделирования.....	15
<i>Арешин Н. А.</i>	
Связь неотектонических деформаций разломной зоны Чарли Гиббс на поверхности дна с глубинными мантийными неоднородностями	16
<i>Артемов О. А., Соколов С. Ю.</i>	
Образование Западно-Сибирского осадочного бассейна в результате метаморфизма с уплотнением пород в земной коре	17
<i>Артюшков Е. В., Чехович П. А.</i>	
Особенности процессов субдукции и апвеллинга в геодинамическом развитии Земли	18
<i>Астафьев Д. А.</i>	
Моделирование напряженного состояния земной коры и среднесрочный прогноз землетрясений с искусственным интеллектом.....	19
<i>Атабеков И. У., Атабеков А. И.</i>	
Анализ напряженно-деформированного состояния участков литосферы разного масштаба на территории Западно-Сибирской плиты на основе многоуровневого численного моделирования	20
<i>Ахметов А.</i>	
Изучение процессов тектоники и геодинамики в свете Галактоцентрической парадигмы	21
<i>Баренбаум А. А.</i>	
Тектонофизические условия и следствия существования в земной коре слоя предельно напряженного состояния	22
<i>Батугин А. С.</i>	
Флюидонасыщение литосферы Евразийского складчатого пояса: магнитотеллурические данные	23
<i>Белявский В. В.</i>	
Оценка возможной зависимости фазового состояния УВ от характера и интенсивности неотектонических движений Чарджоуской ступени Бухаро-Хивинского региона	24
<i>Бикеева Л. Р.</i>	

Структурные перестройки трансформного разлома Эндрю-Бейн в позднем мелу-палеоцене	25
<i>Боголюбский В. А., Дубинин Е. П., Грохольский А. Л.</i>	
Структурные парагенезы некоторых природных объектов Балтийского щита (по методу Л. М. Расцветаева)	26
<i>Бондарь И. В., Маринин А. В.</i>	
О природе нелинейности параметров сейсмического режима	27
<i>Бугаев Е. Г.</i>	
Вклад гидроизостазии в сейсмичность на примере юга о. Сахалин	28
<i>Булгаков Р. Ф.</i>	
Анализ данных каталога ISC землетрясений Туркменистана с 1964 по 2021 гг.	29
<i>Бурмин В.Ю., Петросян Г.Р.</i>	
Тектонический фактор локализации эндогенных руд	30
<i>Васильев Н. Ю., Мострюков А. О., Петров В. А.</i>	
Напряженно-деформированное состояние земной коры Северного Тянь-Шаня на основе анализа механизмов очагов землетрясений и результатов GPS мониторинга	31
<i>Виляев А. В.</i>	
Комплексное исследование сейсмических циклов сильнейших землетрясений в зонах субдукции	32
<i>Владимирова И. С.</i>	
Причина деформаций западного склона вулкана Шивелуч, выявленных методами РСА интерферометрии в постпароксизмальную фазу извержения 11.04.2023	33
<i>Волкова М. С., Михайлов В. О., Горбач Н. В.</i>	
Построение трехмерной геомеханической модели и прогноз зон развитой трещиноватости на одном из нефтегазовых месторождений Западной Сибири	34
<i>Воронов И. А., Дубиня Н. В.</i>	
Определение максимального горизонтального напряжения на основе неупругого разрушения вокруг ствола скважин и методов машинного обучения	35
<i>Гараванд А.</i>	
Сейсмическая энергия, диссипация и параметры очага землетрясения	36
<i>Гарагаи И. А.</i>	
Модель формирования покмарков в результате разложения газогидратов	37
<i>Гарагаи И. А.</i>	
Деформации рельефа и геологического разреза под действием грязевого вулканизма	38
<i>Глазырин Е. А.</i>	
Кинематические параметры земной коры и верхней мантии южной части полуострова Камчатка по новым сейсмологическим данным	39
<i>Гоев А. Г., Алешин И. М., Резниченко Р. А.</i>	
Напряженно-деформированное состояние природных массивов по данным структурной геологии и БПЛА	40
<i>Гордеев Н. А.</i>	
Комплексный подход к изучению юго-восточного борта Горного Алтая	41
<i>Гордеев Н. А.</i>	
Блоковой строение Архангельской алмазоносной провинции по данным метода микросейсмического зондирования	42
<i>Данилов К. Б.</i>	

Модификация литосферы по данным о затухании сейсмических волн	43
<i>Добрынина А. А., Саньков В. А.</i>	
Прямые и обратные задачи изучения естественной трещиноватости в геомеханике месторождений углеводородов.....	44
<i>Дубиня Н. В., Тихоцкий С. А.</i>	
Некоторые особенности трещинообразования в гранитоиде	45
<i>Дьяур Н. И., Чистякова А. В., Багдасарян Т. Э., Егоров Н. А.</i>	
Геофизические особенности проявлений золотого оруденения Ауминзатау-Бельтауского рудного района	46
<i>Жанибеков Б. О., Умматов Н. Ф., Турапов М. К., Беркинов Н. А.</i>	
Динамика афтершоков сильного землетрясения: К 130-летию закона Омори.....	47
<i>Завьялов А. Д.</i>	
Выделение Чандлеровского колебания полюса фильтрацией Калмана вблизи резонанса	48
<i>Зотов Л. В., Ольховский А.</i>	
Неполные симметричные триады тектонических землетрясений	49
<i>Зотов О. Д., Гульельми А. В., Завьялов А. Д., Клайн Б. И.</i>	
Использование модели активных разломов земной коры для оценки сейсмической опасности территории Узбекистана	50
<i>Ибрагимов Р. С., Ибрагимова Т. Л., Мирзаев М. А., Аишуров С. Х.</i>	
Тектонофизические исследования о. Сахалин	51
<i>Каменев П. А., Маринин А. В., Сим Л. А., Богомолов Л. М., Лукманов А. Р., Дегтярев В. А.</i>	
О результатах сопоставления кинематики разрывных нарушений Сахалина на основе геологических и сейсмологических методов	52
<i>Каменев П. А.</i>	
Пространственно-временные свойства современной глобальной геодинамики.....	53
<i>Касьянова Н. А.</i>	
Магматическая активность вулканов Ключевской и Безымянный, предшествующая их извержениям	54
<i>Кириухин А. В., Бергаль-Кувикас О. В., Лемзиков М. В.</i>	
Тектоно-гравитационные детачменты северного склона Большого Кавказа (Адыгейский сектор)	55
<i>Колодяжный С.Ю., Кузнецов Н.Б., Махиня Е.И., Шалаева Е.А., Данцова К.И.</i>	
Сейсмогидрогеодинамические эффекты в задачах геофизического мониторинга и прогноза землетрясений	56
<i>Копылова Г. Н.</i>	
Перспективы изучения внутренней структуры сдвиговых зон в аналоговых моделях из влажной глины	57
<i>Корбутяк А. Н., Фролова Н. С., Чикатуева В. Ю., Арешин Н. А.</i>	
Сейсмические деформации в постройках Генуэзской крепости Феодосии, Крым.....	58
<i>Корженков А. М., Ларьков А. С., Моисеев Д. А., Овсяченко А. Н.</i>	
Комплексные исследования зоны сопряжения рыхлых отложений и скальных пород в северной части Карельского перешейка	59
<i>Королева А. О., Бондарь И. В., Шварев С. В.</i>	
Строение областей вторжения мантийного флюида по результатам анализа сейсмических МОГТ, ГСЗ И электромагнитных МТЗ данных	60
<i>Кузин А. М.</i>	

Волноводы консолидированной коры и дегазация Земли	61
<i>Кузин А. М.</i>	
Деформированное состояние поднятий земной поверхности при разработке нефтегазовых месторождений.....	62
<i>Кузьмин Д. К.</i>	
Применение методов машинного обучения к задаче выделения и классификации трещин на основе данных расширенного комплекса геофизических исследований скважин	63
<i>Куприн Д. Ю., Архипов Н. Д., Дубиня Н. В.</i>	
«Ареальный рифтогенез»: структура, эволюция, геодинамика	64
<i>Леонов М. Г.</i>	
О проблеме верификации результатов численного эксперимента	65
<i>Лермонтова А. С.</i>	
Современный этап активизации роев землетрясений в регионе северного Тянь-Шаня и прилегающих территорий, и термодинамические параметры роев землетрясений.....	66
<i>Литовченко И. Н., Лютикова В. С.</i>	
Развитие методики идентификации зон разрывных нарушений методами ДЗЗ активными и пассивными съемочными системами высокого и сверхвысокого пространственного разрешения.....	67
<i>Малышкин Т. Е., Гордеев Н. А.</i>	
Распределение деформаций земной коры в областях орогенов Центральной Азии и Южной Сибири по данным ГНСС наблюдений	68
<i>Мансуров А. Н.</i>	
Новейшие разрывы юго-восточной части Горного Алтая.....	69
<i>Мануилова Е. А.</i>	
Развитие структурно-парагенетического метода анализа малых разрывных нарушений Л. М. Расцветаева	70
<i>Маринин А. В., Тверитинова Т. Ю.</i>	
Распространение ударных волн и волн напряжений в гетерогенном твердом теле (лабораторные и натурные эксперименты)	71
<i>Махмудов Х. Ф.</i>	
Допороговое ударное разрушение одноосно-сжатого гранита	72
<i>Махмудов Х. Ф., Щербаков И. П., Чмель А. Е.</i>	
Анализ разломной тектоники Кольского полуострова и её роли в рудообразовании на основе результатов дистанционных региональных исследований.....	73
<i>Минаев В. А., Устинов С. А., Петров В. А., Свечеревский А. Д., Нафигин И. О.</i>	
Герменевтико-нарративный подход как способ сравнения аргументов конкурирующих геологических гипотез.....	74
<i>Миронов В. А.</i>	
Херсонесские землетрясения: локализация и параметризация	75
<i>Моисеев Д. А., Корженков А. М., Овсяченко А. Н., Ларьков А. С.</i>	
Параллельные вычисления в задаче поиска разрывных нарушений	76
<i>Молчанов А. Б., Гордеев Н. А.</i>	
Изучение генезиса надлитостатических напряжений коры Алтая методом численного моделирования	77
<i>Мягков Д. С.</i>	

Использование результатов геодинамического моделирования для интерпретации геоэлектрических разрезов коры Восточной Фенноскандии	78
<i>Мягков Д. С.</i>	
Возможное воздействие пульсаций геомагнитного поля на афтершоковые последовательности сильных землетрясений	79
<i>Новиков В. А.</i>	
Анализ влияния распределения пространственных ориентаций естественных трещин на точность решения обратной задачи реконструкции напряженного состояния геологической среды	80
<i>Новикова Е. В., Дубиня Н. В.</i>	
Исследование возможностей физически-информированных нейронных сетей для решения волнового уравнения и оценки сейсмических свойств геологической среды	81
<i>Нугманов И. И.</i>	
Геодинамическая модель формирования Рассохинского и Балахнинского мегавалов по результатам региональных геолого-геофизических работ в Енисей-Хатангском региональном прогибе	82
<i>Обухов А. Н., Корнеев А. А., Каламкарров С. Л., Лошакова И. Ф., Иванова С. Р.</i>	
Моделирование сдвигового разрушения сильно напряженного массива горных пород	83
<i>Одинцев В. Н., Макаров В. В.</i>	
О возможности краткосрочного прогноза горных ударов на рудниках	84
<i>Осика В. И., Калашников Н. В., Кочетков Б. М., Ловчиков А. В., Павлов Е. И., Рахимов Р. Г.</i>	
Ориентационная природа отклика порового давления в приразломной зоне на прохождение сейсмических волн: теория и верификация	85
<i>Пантелеев И. А.</i>	
Электрогидравлическая система Инова: от истоков к современному состоянию	86
<i>Патонин А. В., Пономарев А. В., Шихова Н. М.</i>	
Парамуширское землетрясение 25 марта 2020 года	87
<i>Полец А. Ю.</i>	
Изучение строения геотермальных месторождений при помощи пассивной сейсмики	88
<i>Преснов Д. А., Котов А. Н., Нуждаев И. А., Тоцов С. А.</i>	
Новые возможности тектонофизики в решении проблем сейсмической опасности	89
<i>Ребецкий Ю. Л.</i>	
Механизм образования открытой трещиноватости в осадочных бассейнах	90
<i>Ребецкий Ю. Л.</i>	
О физике разноглубинных землетрясений – подтверждение теоретических моделей и новые возможности для прогноза	91
<i>Родкин М. В.</i>	
Тектонические, магматические и металлогенические особенности Южного Каспия и сопредельных структур	92
<i>Романько А. Е., Имамвердиев Н. А., Викентьев И. В., Рашиди Б., Хейдари М., Полецук А. В., Савичев А. Т.</i>	
О минимальной магнитуде землетрясений, отклик на которые регистрируется в нижней ионосфере	93
<i>Рябова С. А., Шалимов С. Л.</i>	

Комплексное изучение напряженно-деформированного состояния горного массива Ангаракан-Муяканского междуречья (северо-восточный фланг Байкальской рифтовой системы).....	94
<i>Саньков В. А., Мирошниченко А. И., Саньков А. В., Парфеевец А. В., Добрынина А. А., Лебедева М. А., Ефимов Е. Ю.</i>	
Землетрясение в Турции 2023 года и сейсмогеодинамика Кавказско-Анатолийско-Аравийского региона.....	95
<i>Свалова В. Б.</i>	
Сравнительная геодинамика и нефтегазоносность Кавказско-Каспийского и Карибско-Мексиканского регионов.....	96
<i>Свалова В. Б.</i>	
Программное обеспечение для тектонофизической интерпретации разрывных структур различных масштабных уровней на основе модели развития вторичных структур в зоне скола П. Л. Хэнкока.....	97
<i>Свечеревский А. Д., Устинов С. А.</i>	
К вопросу об определении полярности магнитного поля по наклонению.....	98
<i>Семаков Н. Н.</i>	
Зонно-блоковая структура и напряженно-деформированное состояние осадочного чехла на крупнейшем газоконденсатном месторождении Сибири: тектонофизический анализ	99
<i>Семинский К. Ж., Бурзунова Ю. П., Борняков С. А., Мирошниченко А. И., Бобров А. А., Семинский А. К.</i>	
Блочные тектонические напряжения района Чуйско-Курайской впадины Горного Алтая .	100
<i>Сим Л. А., Маринин А. В.</i>	
Механика образования сдвиговых протяженных разломов в ледяном покрове Арктики по натурным наблюдениям на дрейфующих станциях «Северный полюс». № 93	101
<i>Смирнов В. Н.</i>	
Параметризация неизвестных палеоземлетрясений внутригорных долин Алтая	102
<i>Стрельников А. А.</i>	
Оценка сейсмичности в зоне границ Охотоморской плиты в районе Японских островов	103
<i>Ступина Т. А., Бушенкова Н. А.</i>	
Влияние процессов деформации топографии морского дна на эволюцию зоны стабильности поддонных газовых гидратов.....	104
<i>Суетнова Е. И.</i>	
Распределение во времени снятия напряжений в сейсмоактивных регионах (на примере Северного Тянь-Шаня и о. Сахалин)	105
<i>Сычев В. Н., Богомолов Л. М., Сычева Н. А.</i>	
Напряженное-деформированное состояние земной коры Алтае-Саянской горной области .	106
<i>Сычева Н. А.</i>	
Сравнение некоторых оценок деформации земной коры Алтае-Саянской горной области полученных на основе методов СТД и МКА	107
<i>Сычева Н. А., Ребецкий Ю. Л.</i>	
Проявление условий меридионального сжатия в разновозрастных орогенах Евразии.....	108
<i>Тверитинова Т. Ю.</i>	
Глобальное потепление как причина активизации землетрясений	109
<i>Тетельмин В. В.</i>	
Упругие изгибы толстых литосферных плит	110
<i>Трубицын А. П., Трубицын В. П.</i>	

Аналитическая модель пре-, ко- и постсейсмических горизонтальных деформаций сдвига и сжатия литосферных плит.....	111
<i>Трубицын В. П., Трубицын А.П.</i>	
Роль новейших тектонических структур при выявлении особенностей гидрогеологических условий артезианских бассейнов (на примере отдельных территорий Узбекистана)	112
<i>Турсунметов Р. А., Хасанбаев Х. Ф.</i>	
К вопросу о геодинамике локальных рудоносных площадей (на примере Даугызтауского рудного поля Кызылкумской золоторудной провинции)	113
<i>Умматов Н. Ф., Турапов М. К.</i>	
Тектонофизическое обоснование выбора основной плоскости разрыва на диаграммах механизмов очагов землетрясений по данным полевых наблюдений.....	114
<i>Умурзаков Р. А.</i>	
Выявление и региональная тектонофизическая интерпретация структур в районе Туяканского рудного узла на основе данных дистанционного зондирования в контексте прогноза рудообразующих систем	115
<i>Устинов С. А., Чепчугов А. М., Петров В. А., Яровая Е. В., Свечеревский А. Д., Томаровская М. А.</i>	
Вопросы влияния внешних природных и техногенных процессов, явлений и факторов на современные движения земной коры в районе и на площадке размещения объектов использования атомной энергии	116
<i>Фихиева Л. М., Лободенко И. Ю.</i>	
Проблема аналогового моделирования хрупких деформаций в интрузивных массивах сдвиговых зон на примере Баймской рудной зоны	117
<i>Фролова Н. С., Арешин Н. А.</i>	
О восстановлении смещений на поверхности горной выработки, когда они уже произошли в момент ее создания. Теория и эксперимент	118
<i>Чанышев А. И., Чецин Д. О., Плохих В. В., Городилов Л. В., Рублев Д. Е., Кордубайло А. О.</i>	
О косом внедрении жесткого клина в первоначально анизотропную среду	119
<i>Чанышев А. И., Белоусова О. Е., Лукьяшко О. А.</i>	
Бугульдейско-Чернорудский грабен – кайнозойская структура в зоне краевого шва Сибирского кратона.....	120
<i>Черемных А. В., Бобров А. А., Декабрёв И. К., Черемных А. С., Гридин Г. А., Павлов Д. В., Юрьев А. А.</i>	
О порождении электротеллурических сигналов с крутыми фронтами (SES) трещинами при вариации локальной НДС.....	121
<i>Чирков Е. Б.</i>	
Об особенностях амплитудных электротеллурических сигналов с крутыми фронтами (SES), предположительно отражающих изменение природы их источников.....	122
<i>Чирков Е. Б., Лементуева Р. А.</i>	
Об этапе деформации складчатой структуры Большого Кавказа в зоне Главного Кавказского Разлома в районе г. Шахдаг, занимающем место между складчатостью и ростом горного сооружения	123
<i>Яковлев Ф. Л.</i>	
О возможностях использования программы визуализации 3D изображения малых форм в решении задач структурной геологии (на примере складок Таласского хребта Тянь-Шаня).....	124
<i>Яковлев Ф. Л., Гордеев Н. А., Коваль А. А.</i>	

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ПОРОД ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ СМЕЩЕНИЙ НА ОГРАНИЧЕННОМ ПО ПЛОЩАДИ УЧАСТКЕ ПОВЕРХНОСТИ. ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Абдулин И. М.¹, Белоусова О. Е.², Городилов Л. В.³, Рублев Д. Е.⁴, Степанов Д. В.⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} – *Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия; e-mail: i.m.abdulin@mail.ru*

На поверхности полупространства на ограниченном его участке измеряется три смещения – одно по вертикали и два смещения в горизонтальных направлениях. Поверхность считается свободной от напряжений. Дается конечно-разностный алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния массива пород с поверхности вглубь. Задача решается в пространственном случае и в случае плоской деформации (или плоского напряженного состояния). Для проверки расчетной схемы проведен эксперимент с движением пробойника в грунте и замером смещений на поверхности. По данным измерения смещений на поверхности определяются: положение пробойника, приложенная к нему сила, размеры пробойника, напряженно-деформированное состояние вокруг него.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда, проект № 22-17-00188.

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ
КЕМИНСКОГО КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 1911 Г. В СРЕДНЕЙ
АЗИИ И ШЕМАХИНСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 1902 Г. НА КАВКАЗЕ (В СВЯЗИ С
ПРОБЛЕМОЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ)**

Абдуллаев А. У.

*ТОО «Национальный научный центр сейсмологических наблюдений и исследований», г. Алма-Ата,
Казахстан; e-mail: u.abdullaev@mail.ru*

В 2021 году прошло 110-летие Кеминского катастрофического землетрясения в Средней Азии (Тянь-Шань), которое является одним из самых сильных в Континентальной Азии за последние два века. Гидрогеологические аномалии и последствия этого землетрясения были тщательно задокументированы благодаря наблюдательности жителей Семиречья, Чуйской и Иссыккульской областей. В 2022 году исполнилось 120 лет катастрофического Шемахинского землетрясения на Кавказе, о котором остались исторические документации о гидрогеологических предвестниковых аномалиях и о последствиях этого крупного сейсмического события. Совместное изучение этих уникальных и бесценных материалов могут быть положены в основу разработки методов средне, -краткосрочного прогноза сейсмических катастроф с использованием временных аномалий флюидных параметров земной коры.

ГЕНЕТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ РАЗВИТИЯ ОЧАГОВ СОВРЕМЕННЫХ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМ ТЯНЬ-ШАНЯ С СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТЬЮ

Абдуллаев А. У.

*ТОО «Национальный научный центр сейсмологических наблюдений и исследований», г. Алма-Ата,
Казахстан; e-mail: u.abdullaev@mail.ru*

В докладе изложены результаты многолетних исследований с целью прогнозирования сильных землетрясений на основе изучения гидрогеохимических предвестников землетрясений. Было установлено множество доказательств о роли подземных вод в сейсмическом процессе. Современные гидротермальные системы в крупных гидрогеологических структурах земной коры являются не только яркими проявлениями аномального теплового потока недр, но и непосредственными участниками формирования очагов землетрясений и сейсмической активности. Наиболее эффективными индикаторами этого процесса является азотно-щелочные термы глубоких тектонических трещин, развитых в тектонически активированных областях современного горообразования. Классическим примером образования азотных щелочных термов в гидрогеологических массивах является Тянь-Шаньский ороген. Характерной особенностью таких систем является их четкая приуроченность к линейно-вытянутым крупным краевым разломам в складчато-глыбовых структурах допалеозойских и палеозойских горных массивов гранитоидного состава. Локализованные очаговые выходы этих терм на дневной поверхности геологических структур проявляются в виде хорошо выраженных протяженных «термальных линий» (30-100 км) вдоль крупных тектонических разломов.

ПАРАДОКС СЕЙСМИЧЕСКОГО МИКРОРАЙОНИРОВАНИЯ И О СЕЙСМОТЕКТОНИКЕ СЕВЕРНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ОЗЕРА ИССЫК-КУЛЬ

Алешин А. С.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: asa@ifz.ru

То, что сейсмическая интенсивность на рыхлых грунтах значительно выше, чем на скале является одной из аксиом инженерной сейсмологии. Количественное выражение этого положения нашло отражение в известной формуле С. В. Медведева, где для оценки приращения сейсмической интенсивности сравниваются сейсмические жесткости рыхлых и скальных грунтов. Справедливость этого соотношения основывалась на предположении равенства потоков энергии в двух соседних точках. В работе [Алешин, 2010] это положение было подвергнуто критике, поскольку плотность потока энергии при переходе от скального основания к вышележащим рыхлым грунтам уменьшается в силу того, что часть энергии отражается в нижнее полупространство. Долгое время это физически ясное положение не находило конкретного подтверждения. Между тем опыт сейсмических наблюдений на северном побережье оз. Иссык-Куль в районе скального выступа Пришиб, где в пунктах сейсмологической регистрации располагались также сейсморазведочные профили, полностью подтверждает приведенное выше предположение о больших амплитудах колебаний от землетрясений на скальных выходах на дневную поверхность в сравнении с соответствующими параметрами волнового поля в пунктах, сложенных рыхлыми грунтами. Этот экспериментальный факт в настоящей работе описан и всесторонне обсужден. Уменьшение амплитуд колебаний в пунктах регистрации, где грунтовый массив представлен рыхлыми грунтами большой мощности (порядка 1000 м и более) отмечено, как с использованием импульсного возбуждения, так и с использованием реальных записей землетрясений. Полученные результаты позволяют сделать заслуживающие внимание выводы об особенностях сейсмотектоники северного Прииссыккуля. В частности, не подтвердилась гипотеза о происхождении скального выступа Пришиб, как гравитационного отторженца от основного хребта.

ОЦЕНКА ВНУТРЕННЕГО ПОГЛОЩЕНИЯ И РАССЕЯНИЯ И ИХ ВКЛАД В ОБЩЕЕ ЗАТУХАНИЕ ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ АЛТАЕ-САЯНСКОЙ СКЛАДЧАТОЙ ОБЛАСТИ

Арапов В. В.

*Алтае-Саянский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», г. Новосибирск, Россия; e-mail:
arapovviktor90@gmail.com*

Доклад посвящен оценке внутреннего поглощения и рассеяния и их вклада в общее затухание для наиболее активных тектонических структур Алтае-Саянской складчатой области. Для анализа использовались записи крупных землетрясений магнитудой $M_I > 2.5$, зарегистрированные стационарной и временной сетями станций АСФ ФИЦ ЕГС РАН. В настоящей работе использовался метод Веннерберга позволяющий оценить вклад поглощения Q_i^{-1} и рассеяния Q_{sc}^{-1} в общее затухание Q_T^{-1} . Определены зоны низких и высоких значений добротности. На основе полученных данных выполнен расчет значений моментных магнитуд M_w для крупных землетрясений региона.

СТРУКТУРНЫЙ ФАКТОР ЛОКАЛИЗАЦИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МЕДИ В БАИМСКОЙ РУДНОЙ ЗОНЕ: РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛОГОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Арешин Н. А.

МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия; e-mail: skaut1909@mail.ru

Баимская рудная зона (БРЗ) представляет собой широкую сложнопостроенную сдвиговую зону с несколькими малоглубинными интрузиями, испытавшими длительную деформацию правого сдвига. С интрузиями связана более ранняя медно-порфировая и более поздняя низкотемпературная золото-серебряная минерализация. Месторождения и рудопроявления меди связаны преимущественно с меридиональными разрывами, ранее трактовавшимися как разрывы растяжения [Читалин А. Ф. Структурные парагенезы и рудная минерализация Баимской сдвиговой зоны. Западная Чукотка // Российская тектонофизика. К 100-летию юбилею М. В. Гзовского: сборник статей. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2019. С. 343-359]. Наиболее крупные месторождения (в их число входит известное месторождение «Песчанка») располагаются вблизи контактов центрального (Егдыгкычского) массива БРЗ.

Аналоговое моделирование проводилось на специальной установке, к которой крепился прибор, позволяющий воспроизводить сдвиг в широкой зоне. Интрузии имитировались фаянсовой влажной глиной или песком – сухим и со связующими добавками. Матриксом служила влажная каолиновая глина. При сдвигании модели с телами из глины, как в самих телах, так и в матриксе формировались R-сколы (в матриксе также менее выраженные R'-сколы). Ориентировка R-сколов в модели в точности соответствует ориентировке меридиональных разрывов БРЗ. Важно, что в модели отчетливые раскрытые трещины локализуются вдоль контактов тел с матриксом в тех местах, где эти контакты имеют ту же ориентировку, что и R-сколы. В БРЗ к аналогичным участкам приурочены месторождения меди, однако они располагаются все же на небольшом расстоянии от контакта. В случае если интрузивное тело имитировалось песком, то раскрытые трещины формировались близ тех же контактов, но уже внутри тела.

Таким образом, локализация месторождений меди в центральном интрузивном массиве БРЗ обусловлена формированием раскрытой трещиноватости на участках максимального проявления деформации сдвига вдоль меридиональных R-сколов в ослабленных приконтактных зонах интрузии. Аналоговое моделирование интрузивных массивов в БРЗ показало, что особенности разрывной структуры лучше выражены в моделях из влажной глины (см. публикацию Н. С. Фроловой в данном сборнике), но некоторые детали, как в описанном выше случае, больше соответствуют природе в моделях из песка.

СВЯЗЬ НЕОТЕКТЕНИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ РАЗЛОМНОЙ ЗОНЫ ЧАРЛИ ГИББС НА ПОВЕРХНОСТИ ДНА С ГЛУБИННЫМИ МАНТИЙНЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ

Артемов О. А.¹, Соколов С. Ю.²

^{1,2} – Геологический институт РАН, г. Москва, Россия; e-mail: oleg.artemov.00@mail.ru

Разломная зона Чарли Гиббс, расположенная на широте ~52°с.ш. в Северной Атлантике, является сдвоенной трансформной системой с суммарным смещением сегментов Срединно-Атлантического хребта (САХ) ~350 км. В ее строении выделяют современные деформации осадочного чехла, хорошо картируемые по сейсмоакустическим данным верхней части разреза и рельефу дна, а также признаки субмеридионального смещения приразломных уступов, вариативность морфологии кровли базальтового океанического слоя, неравномерное распределение сейсмичности вдоль разломных трогов. Характер потенциальных геофизических полей также отличается от стандартной картины вдоль САХ в районах, сегментированных трансформными разломами. Распределение скоростей сейсмических волн по данным сейсмотомографии показывает контрастную неоднородность термального состояния мантии, которая отражается в строении поверхностных структур. Это указывает на связь глубинного строения мантии с неотектоническими процессами на поверхности дна, которая в исследуемом районе имеет уникальные особенности. Одним из главных факторов, определяющих их характер, является наличие к северу от разломной зоны Чарли Гиббс Исландского плюма и его приповерхностное перетекание на юг вдоль оси САХ, для которого разломная зона является структурным «холодным» барьером. Таким образом, разломная зона разделяет области мантии с контрастным реологическим состоянием, что определяет неотектонический режим на поверхности дна.

Наиболее полные данные о разломной зоне Чарли Гиббс стандартными съемочными методами были получены впервые в 2020 году в экспедиции ГИН РАН в 50-м рейсе НИС «Академик Николай Страхов». Работы проводились методами сейсмоакустического профилирования, многолучевого эхолотирования, донного опробования и магнитометрии. Также при обработке использовались данные гравитационного поля и его редукции, сейсмотомографии, скоростях спрединга и сейсмичности из открытых источников. В рамках исследования особое внимание уделялось описанию неотектоники по картированию приповерхностных деформаций осадочного чехла – дизъюнктивным и пликативным нарушениям.

Полученное пространственное распределение выделенных типов деформаций может быть непротиворечиво интерпретировано воздействием глубинных мантийных неоднородностей на поверхность дна при контрастном реологическом состоянии на северном и южном крыльях сдвигового нарушения, выраженном в скоростях сейсмических волн, аномалиях Буге, пространственно-временном распределении сейсмичности и других характеристиках.

ОБРАЗОВАНИЕ ЗАПАДНО-СИБИРСКОГО ОСАДОЧНОГО БАССЕЙНА В РЕЗУЛЬТАТЕ МЕТАМОРФИЗМА С УПЛОТНЕНИЕМ ПОРОД В ЗЕМНОЙ КОРЕ

Артюшков Е. В.¹, Чехович П. А.²

^{1,2} – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия;*
e-mail: arty-evgenij@yandex.ru

Образование крупных осадочных бассейнов на континентах обычно объясняют погружением земной коры, обусловленным растяжением литосферного слоя, рифтогенезом. Для описания развития во времени пострифтового погружения широко используется модель чистого сдвига, предложенная Дэном МакКензи в 1978 г. В его работе не было приведено, однако, сравнения пострифтового погружения, рассчитанного теоретически, с хорошо описанным погружением коры в каком-либо крупном известном осадочном бассейне. Модель чистого сдвига была, однако, принята, как многими исследователями-геофизиками, так и нефтяными компаниями, и в настоящее время она является одной из главных моделей в геодинамике. С помощью этой модели, с ее некоторыми усложнениями, часто делаются выводы о времени созревания нефти и газа на разных глубинах и о возможных путях их последующей миграции.

С растяжением литосферы большинство авторов связывают формирование и крупнейшего в мире Западно-Сибирского осадочного бассейна. Предполагается, что бассейн сформировался в процессе пострифтового погружения коры, которое постепенно развилось вслед за сильным растяжением литосферы, произошедшим около 250 млн. лет назад. Характерной особенностью пострифтового погружения во всех моделях является убывание его скорости во времени. Как показало рассмотрение данных сверхглубоких скважин, а также сейсмогеологических разрезов общей протяженностью 2500 км, в Западно-Сибирском бассейне погружение коры не замедлялось, а сильно ускорялось со временем. На этих разрезах нами был проведен непосредственный подсчет растяжения земной коры на фундаменте мезозойско-кайнозойского осадочного чехла. Оказалось, что это растяжение было слабым, и оно обеспечило не более 1% наблюдаемого погружения коры.

Западная Сибирь расположена вдали от активных границ между плитами, и кора в ней близка к изостатически равновесному положению. В таких условиях накопление ≥ 6 км осадков могло произойти только вследствие уплотнения в нижней коре пород основного состава вследствие проградного метаморфизма. Чтобы катализировать метаморфизм, был необходим приток в литосферу глубинных мантийных флюидов, обладавших поверхностно-активными свойствами, смачивавших зерна пород и проникавших в земную кору за времена ~ 10 млн. лет. Большие вариации скорости погружения коры во времени и на площади указывают на соответствующие вариации притока в кору мантийных флюидов. Ранее такие явления были описаны нами для осадочного бассейна Московской синеклизы в среднем и в позднем девоне.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ СУБДУКЦИИ И АПВЕЛЛИНГА В ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ РАЗВИТИИ ЗЕМЛИ

Астафьев Д. А.

ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Москва, Россия; e-mail: daastafiev@yandex.ru

С использованием материалов сейсмотомографии и других геофизических методов обосновываются варианты механизмов поглощения коромантийного вещества в поясах и областях субдукции. Во взаимосвязи с механизмом субдукции анализируются особенности процесса апвеллига мантийного вещества и спрединга океанических коромантийных секторов в поясах срединно-океанических хребтов. Предлагается объяснение возможных положений слэбов океанической литосферы.

Предлагается альтернативный вариант мобилистской концепции – концепция геодинамики коромантийных секторов, движущихся в трёх группировках, сформировавшихся в процессе распада Пангеи Вегенера: Африкано-Евразийско-Австрало-Западно-Тихоокеанской, Американско-Гренландской и обособленной Антарктической, которые представляют собой реальные конвективные ячейки Бенара g-типа в отличие от концепции тектоники литосферных плит (ТЛП), согласно которой латерально движутся литосферные плиты в процессе астеносферной конвекции, либо общемантийной, либо двухъярусной или даже многоярусной в процессе еще более сложного перемещения объёмов мантийного вещества.

В результате ныне господствующая концепция ТЛП преобразована в существенно более совершенную концепцию геодинамики коромантийных секторов, открывающую новые возможности в осмыслении геодинамики Земли, океано- и континентогенеза, сейсмичности, а в итоге позволяющую подойти к созданию новых геотехнологий, в частности, контроля и управления напряженным состоянием недр в пределах конкретных регионов, предсказания и предотвращения сильных землетрясений, а также решения многих практических задач (повышения извлекаемости из недр углеводородов и др. полезных ископаемых, разработки и постановки тектонофизических экспериментов и т.д.). Это возможно при организации целенаправленного сейсмотомографического мониторинга недр крупных регионов в комплексе с GPS-ГЛОНАСС съёмками и другими геофизическими методами.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ И СРЕДНЕСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С ИСКУССТВЕННЫМ ИНТЕЛЛЕКТОМ

Атабеков И. У.¹, Атабеков А. И.²

¹ – *Институт сейсмологии АН РУз, г. Ташкент, Республика Узбекистан; e-mail: atabekovi@mail.ru*

² – *Министерство цифровых технологий Республики Узбекистан, г. Ташкент, Республика Узбекистан*

Землетрясения происходят в местах земной коры, где прочность достигает критические значения, возникают трещины, которые возбуждают сейсмические волны. Они возникают на больших глубинах, где давление огромное, и сдвигам, в отличие от других видов деформирования, легче осуществляться, потому что они не требуют изменение объема. Землетрясения чаще всего происходят на границах имеющихся разломов тектонических плит. Сейсмологи стараются найти критические признаки, указывающие на возможности землетрясения. К сожалению, стопроцентного такого признака на сегодняшний день не существуют. В зависимости от ситуаций срабатывает или не срабатывает тот или иной признак. Почему дают сбой эти признаки - тоже не всегда удастся распознать, чтобы разработать свод правил. Искусственный интеллект, может усовершенствовать сортировку признаков, разрабатывая надежные правила классификации, изучая и генерируя модель с помощью алгоритмов непосредственно из сейсмологических, тектонических, электромагнитных, гидродинамических и т.п. баз данных. Процесс генерации модели известен как глубокое обучение. Эти модели основаны на структуру мозга и состоят из сети с множеством связанных между собой слоев, имитирующие связанные нейроны. Ключевой особенностью современных нейросетей является то, что они могут анализировать данные и находить скрытые закономерности, которые не всегда очевидны. При этом напряженно-деформированное состояние земной коры становится существенной частью модели.

Напряженно-деформированное состояние земной коры Ферганской депрессии нами смоделировано с учетом наиболее активных разломов и их динамических зон влияния. На основании результатов численного решения уравнения Стокса применительно к Ферганской депрессии рассчитаны основные геодинамические параметры современного движения и выделены наиболее существенные тектонические признаки. Наша модель предназначена для прогнозирования магнитуды и места следующего землетрясения, хотя она не определяет время события. Эта модель прогнозирования была протестирована на исторических и инструментальных данных. При вводе данных о последнем землетрясении она прогнозирует магнитуду и место последующего землетрясения, но без подробностей о дате и времени. Этот результат закладывает основу для будущих исследований, направленных на включение прогнозов с привязкой ко времени.

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УЧАСТКОВ ЛИТОСФЕРЫ РАЗНОГО МАСШТАБА НА ТЕРРИТОРИИ ЗАПАДНО- СИБИРСКОЙ ПЛИТЫ НА ОСНОВЕ МНОГОУРОВНЕВОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ахметов А.

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия;
e-mail: ayan.akhmetov93@gmail.com*

Оценка деформационных процессов в литосфере является одной из фундаментальных задач в науках о Земле. Структура земной коры и верхней мантии является очень неоднородной из-за активных геодинамических процессов, которые постепенно изменяют облик Земли. Следствием данных процессов является возникновение землетрясений, оползней, обвалов и т.д., а также возникновение месторождений полезных ископаемых в определенных регионах. Прогноз опасных геодинамических процессов с целью возможного предотвращения их губительных последствий, а также условий образования ловушек углеводородов с целью выявления потенциальных областей их месторождений, основан, в том числе, и на знании напряженно-деформированного состояния верхних слоев земной коры. Для решения представленной проблемы актуально применение многоуровневого подхода, который позволяет детально оценить напряженно-деформированное состояние литосферы на разных масштабах.

В качестве объектов исследования были выбраны перспективные нефтегазовые провинции на территории Западно-Сибирской плиты. Создана серия компьютерных моделей структур участков литосферы разной мощности на основе геофизических данных профиля «Кварц», который проходит по исследуемым территориям. В ходе компьютерного моделирования геодинамических процессов выявлена закономерность локализации пластической деформации и распределения напряжений в зонах земной коры, в которых расположены залежи нефти и газа, и ловушки углеводородов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-71-01086, <https://rscf.ru/project/23-71-01086/>.

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕКТониКИ И ГЕОДИНАМИКИ В СВЕТЕ ГАЛАКТОЦЕНТРИЧЕСКОЙ ПАРАДИГМЫ

Баренбаум А. А.

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва, Россия; e-mail: azary@mail.ru

Процессы тектоники и геодинамики, вызывающие образование и движение литосферных плит, влияют на другие геологические процессы Земли. Особенно важно их изучение в ранний период развития нашей планеты, когда сформировалась ее литосферная оболочка, где образуются и перемещаются литосферные плиты. Эти вопросы рассмотрены на основе Галактоцентрической парадигмы [1], учитывающей недавно открытое в астрономии явление струйного истечения газопылевого вещества из ядра нашей Галактики [2].

Автором разработаны и апробированы теоретические модели, позволяющие изучать тектонические, климатические и биотические следствия явления струйного истечения, включая раннюю стадию развития Земли [1, 2]. В сообщении обсуждаются важнейшие геодинамические и тектонические следствия этого явления с использованием 4-х таких моделей: 1) галактической модели [3, 4], связывающей цикличность глобальных процессов на Земле с ее бомбардировками галактическими кометами при попадании Солнца в струйные потоки и спиральные рукава Галактики; 2) модели [3], объясняющей полярность образования суперконтинентов бомбардировками Земли галактическими кометами в спиральных рукавах Галактики; 3) модели [5, 6], учитывающей влияние на движение и образование литосферных плит силы Кориолиса, и 4) импактной космогонической модели происхождения Луны [1, 2], вызвавшей возникновение на Земле «магматического океана», его породы частично остыли и превратились в конвективную литосферную оболочку, которая автономно вращается относительно мантии [5, 6] по астеносфере [7, 8].

1. Баренбаум А. А. Галактоцентрическая парадигма в геологии и астрономии. М.: ЛИБРОКОМ. 2010. 546 с.

2. Баренбаум А. А. Галактика, Солнечная система, Земля: Соподчиненные процессы и эволюция. М.: ГЕОС. 2002.

3. Баренбаум А. А. Суперконтинентальная цикличность как следствие бомбардировок Земли галактическими кометами в спиральных рукавах Галактики // ВЕСЭМПГ-2022. - М: ГЕОХИ РАН, 2022, С. 258-264.

4. Barenbaum A.A. Solution of problem questions of astronomy and geology using the optimized galactic model // In Book: Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes – 2022. (Springer) DOI: 10.1007/978-3-031-25962-3.

5. Баренбаум А. А. Вращение литосферной оболочки Земли относительно мантии: новое объяснение феномена «истинного полярного блуждания», участие силы Кориолиса в движении литосферных плит // ВЕСЭМПГ-2023. М: ГЕОХИ РАН, 2023, С. 267-274.

6. Barenbaum A. A. On the issue of “True polar wander” Phenomenon and Its Alternative Physical Interpretation Based on Galactic Model // In Book: Processes in GeoMedia – Volume VII. 2023. (Springer) DOI: 10.1007/978-981-99-6575-5

7. Баренбаум А. А. Образование астеносферы галактическими кометами как новое направление в тектонофизике // Четвертая тектонофизическая конф. в ИФЗ РАН: Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. М.: ИФЗ РАН. 2016. Т.2. Раздел 5. С. 430-438.

8. Баренбаум А. А. Тектонофизика взаимодействия галактических комет с планетами земной группы // Пятая тектонофизическая конф. в ИФЗ РАН: Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. М.: ИФЗ РАН. 2020. С. 86-92.

ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И СЛЕДСТВИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ В ЗЕМНОЙ КОРЕ СЛОЯ ПРЕДЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Батугин А. С.

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Россия;
e-mail: as-bat@mail.ru*

Напряженное состояние земной коры является предметом изучения тектонофизики и представления о нем используются для объяснения геодинамических процессов, происходящих в земной коре. Встречающиеся в современной научной литературе выражения о том, что разломы земной коры или ее участки находятся в напряженном состоянии, «близком к предельному», соотносятся с идеей профессора Петухова И. М. о предельно напряженном состоянии земной коры в целом, сформулированной им в конце 20-го века. Слой предельно напряженного состояния в земной коре формируется в условиях ее горизонтального сжатия и имеет мощность от земной поверхности до некоторой глубины. Сам этот слой имеет дискретное строение со свойственной геологическим телам иерархией и является своеобразной геосферой нашей планеты. С точки зрения существования такого слоя рассмотрены такие геодинамические явления и процессы, как формирование активной блочной структуры земной коры.

Достижение предельно напряженного состояния в земной коре является необходимым, но недостаточным условием для возникновения сейсмических явлений.

На основе концепции существования предельно напряженного состояния земной коры от земной поверхности до некоторой глубины рассмотрен ряд геодинамических эффектов, которые наблюдаются не только при техногенном воздействии на земную поверхность и массив, но и в естественных условиях, рассмотрены необходимые и достаточные условия для возникновения динамических явлений.

ФЛЮИДОНАСЫЩЕНИЕ ЛИТОСФЕРЫ ЕВРАЗИЙСКОГО СКЛАДЧАТОГО ПОЯСА: МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Белявский В. В.

*Центр Геоэлектромагнитных исследований, филиал института Физики Земли, г. Москва, Россия;
e-mail: victor.belyavsky@list.ru*

Целью работ, проводимых магнитотеллурическими методами в складчатых регионах, являлось составление основы для сейсмического районирования территорий, выявление активно развивающихся тектонических структур, поиска полезных ископаемых. Ставились задачи по картированию проводящих блоков и оценки их флюидонасыщения, содержания расплава в литосфере Северо-Кавказского, Алтае-Саянского, Камчатско-Корякского, Средне-Азиатского регионов. Аномалии высокой проводимости, коррелирующие с положением доменов, пониженных скоростей волн в методах МОВЗ и ГСЗ или с повышенным их поглощением, объяснялись насыщением их водной фракцией флюида или расплавом. Исключение составляют графитизированные сланцы высокой проводимости в нижнепалеозойских комплексах Южного Тянь-Шаня, не выраженные дефицитом скорости.

В пределах Таманского полуострова Северного Кавказа содержание флюида с $f_r = 5 - 20\%$ коррелирует с: положением жерл грязевых вулканов, пересечением глубинных разломов с региональными, отделяющими структуры Кавказа от Таманского прогиба. На северо-востоке Новороссийской складчатой зоны у разломов f_r понижается до $1 - 2\%$. Глубинные разломы и шовные зоны, пересекающие Минераловодский выступ и Северо-Кавказский краевой массив, характеризуются содержанием флюида с $f_r = 2-9\%$ сосредоточенного на глубинах $2 - 15$ км.

В Алтае-Саянском регионе гипоцентры землетрясений расположены над кровлей проводников с $f_{rf} = 0.06-1.0 \%$, которые коррелируют с положением доменов с повышенным затуханием обменных волн землетрясений и пониженными скоростями продольных волн (данные МОВЗ—ГСЗ). Повышенной флюидонасыщенностью ($f_{rf} = 0.15-0.6 \%$) характеризуются и глубинные разломы, под которыми растягивающие напряжения ориентированы ортогонально к ним.

В пределах Корякско-Камчатского региона блоки литосферы с высоким содержанием $f_{rf} = 1.6 - 2.4 \%$ и расплава f_{rm} расположены: на пересечении субмеридиональных структур Олюторско-Восточно-Камчатской СФЗ со структурами широтной ориентации. Оцениваемые в них величины f_{rf} и/или f_{rm} , отвечают наблюдаемому дефициту скорости продольных волн. Под вулканами Безымянный, Шивелучский, Толбачинский, Ключевская сопка блоки с $f_{rf} = 1 - 2 \%$ картируются на глубине 10 км и вблизи границы Мохо — $Z = 30$ км ($T = 800^\circ \text{C}$), возможно связанные и с расплавом с $f_{vb} \approx f_{rm} = 5 - 10 \%$.

Видно, что контроль изменения содержания флюида способствует более надежному прогнозу сейсмической опасности и геодинамической активности.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ УВ ОТ ХАРАКТЕРА И ИНТЕНСИВНОСТИ НЕОТЕКТОНИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ ЧАРДЖОУСКОЙ СТУПЕНИ БУХАРО-ХИВИНСКОГО РЕГИОНА

Бикеева Л. Р.

*Институт геологии и разведки нефтяных и газовых месторождений, г. Ташкент, Республика
Узбекистан; e-mail: luizabikeyeva@mail.ru*

Неоген-четвертичные (неотектонические) движения имеют большое значение для решения частных и общих принципиальных задач геологии нефти и газа. Они влияют на ход и интенсивность проявления различных геологических процессов, в том числе на формирование месторождений нефти и газа. Тектоническими процессами неоген-четвертичного возраста создан, в основных чертах, современный структурный план территории Бухаро-Хивинской нефтегазоносной области (БХНГО). Ими обусловлено перераспределение ранее сформировавшихся залежей углеводородов и формирование современного пространственного распределения залежей нефти и газа БХНГО.

Исследования проявлений новейших тектонических движений, проведенные на Скифско-Туранской и Западно-Сибирской эпигерцинских плитах, в Прикаспийской области Русской плиты, показали преимущественную приуроченность газонакопления к зонам интенсивных неотектонических деформаций, а нефтенакопления - к относительно более спокойным зонам. Так на Скифско-Туранской плите, представляющей эпипалеозойскую платформу, разделенную впадиной Каспийского моря на две части, наблюдается чередование зон преимущественно газо- или нефтенакопления. Газоносность отвечает тектонически активным, дифференцированным и относительно приподнятым в новейшую тектоническую эпоху районам, к которым, в частности, относятся Центрально-Каракумский свод и Бухаро-Хивинская синеклиза Каракумского нефтегазоносного бассейна, а преимущественное нефтенакопление - погруженному тектонически менее активному району, окаймляющему впадину Каспийского моря. Предполагается, что отмеченная закономерность распространяется на тектонические элементы более высокого порядка. Возможность выявления подобной зависимости для областей преимущественного газонакопления, таким как Амударьинская НГО, и определение для них показателей направленного поиска залежей, содержащих нефтяные скопления, представляет значительный интерес.

СТРУКТУРНЫЕ ПЕРЕСТРОЙКИ ТРАНСФОРМНОГО РАЗЛОМА ЭНДРЮ-БЕЙН В ПОЗДНЕМ МЕЛУ-ПАЛЕОЦЕНЕ

Боголюбский В. А.¹, Дубинин Е. П.², Грохольский А. Л.³

^{1, 2, 3} – МГУ имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия; e-mail: bogolubskiyv@yandex.ru

Трансформный разлом Эндрю-Бейн разделяет две части Юго-Западно-Индийского спредингового хребта, различные по своему тектоническому строению и эволюции. Формирование разломной зоны связано с начальной стадией раскола Гондваны около 160 млн. лет назад. Он разделял две провинции: западную, связанную с отделением от Антарктиды восточной Африки и восточную, сформированную в результате разделения Индии и Антарктиды. Это обстоятельство привело к неоднократным кинематическим перестройкам геометрии трансформной зоны Эндрю-Бейн. До 70 млн. лет назад Эндрю-Бейн представлял собой мегаразломную зону, находящуюся под непосредственным влиянием плюма Марион, формировавшего Мозамбикский хребет. На разных этапах он мог являться как моно-, так и битрансформной системой, однако точных сведений на данный момент не имеется. 69 млн. лет назад (аномалия С31) направление относительного движения Африканской и Антарктической плит вновь изменилось на северо-северо-западное, но уже к 52 млн. лет назад (С24) вернулось к северо-северо-восточному. Данные изменения оказали значительное влияние на разломную зону и привели к формированию сигмоидальных структур в пассивных частях трансформного разлома с большим количеством трогов и разделяющих их поднятий. Расположенные между двумя прямолинейными пассивными следами, они образуют структуру, близкую к транстенсивному сдвиговому дуплексу. Конкретный механизм и условия формирования столь сложной структуры остаются неясными. Целью данной работы является воспроизведение условий структурных перестроек трансформного разлома на основании физического моделирования. Вещество, используемое в модели, является смесью жидких и твёрдых углеводородов и соответствует критерию подобия океанической литосферы. Изначальная конфигурация включала в себя два наклонных разреза. Между ними также были расположены два коротких наклонных разреза. Расстояние между разрезами было меньше их длины. Вся система разрезов воспроизводила систему трансформного разлома Эндрю-Бейн на момент 69 млн. лет. Основными изменяемыми параметрами в модели был угол наклона всей системы относительно растяжения, соотношение расстояния между разрезами и их длины. На начальной стадии растяжения началось формирование сдвиговых зон, ограничивающих блоки, зажаты между разрезами. Уже на ранних стадиях растяжения можно говорить о формировании сдвигового дуплекса с несколькими активными косыми спрединговыми сегментами, соединённых транстенсивными зонами. Развитие деформаций в пределах сдвигового дуплекса как единой структуры происходили на протяжении всего эксперимента, что позволяет говорить о стабильности данной структуры во времени. Способность структуры сдвигового дуплекса не только к стабильному существованию на протяжении длительного времени, но и к саморазвитию показывает возможность формирования сдвиговых сегментов при изменении направления растяжения в количестве большем, чем было до начала данного процесса. Изгибы пассивных следов подчёркиваются межразломными хребтами, имеющими различную в плане форму, что свидетельствует о том, что вращение блоков действительно имело место и повлияло на формирование данной структуры.

СТРУКТУРНЫЕ ПАРАГЕНЕЗЫ НЕКОТОРЫХ ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ БАЛТИЙСКОГО ЩИТА (ПО МЕТОДУ Л. М. РАСЦВЕТАЕВА)

Бондарь И. В.¹, Маринин А. В.²

^{1,2} – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: bond@ifz.ru*

Важнейшим аспектом структурно-парагенетического метода Л. М. Расцветаева является исследование геомеханических семейств дизъюнктивных нарушений. Под этим семейством понимается вся совокупность нарушений определенного ранга, сформированных или активизированных в данном объеме деформируемой геологической среды в результате единого процесса тектонической деформации. Такие дизъюнктивные нарушения, объединенные в единый парагенез, закономерным образом сочетаются друг с другом и образуют в силу этого определенные структурные рисунки. В данной работе, на примере нескольких природных объектов Кольского полуострова, рассмотрены разноранговые дизъюнктивные нарушения, образующие единые структурные парагенезы.

О ПРИРОДЕ НЕЛИНЕЙНОСТИ ПАРАМЕТРОВ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА

Бугаев Е. Г.

*Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности, г. Москва, Россия;
e-mail: bugaev@secnrs.ru*

Эмпирический закон Гутенберга-Рихтера установлен для Земли в целом и характеризует однотипность разрушения земной коры на различных масштабных уровнях. Региональные графики повторяемости землетрясений (далее – графики повторяемости) в отличие от закона Гутенберга-Рихтера, как правило, нелинейные, что может определяться пространственно-временной и энергетической неоднородностью сейсмического процесса. Природа нелинейности сейсмического процесса рассмотрена на примере сравнительного анализа графиков повторяемости территории Северо-Восточного Кавказа с прогнозными пределами графиков повторяемости (далее – прогнозные пределы). Прогнозные пределы рассчитаны на основе единой дискретно-иерархической модели земной коры с учетом условий ее деформирования и характера разрушения. Приуроченность графиков повторяемости в отдельных диапазонах магнитуд к прогнозным пределам позволяет судить об условиях подготовки и проявления землетрясений, включая характерные, характеризующие среднесрочную сейсмическую опасность, а также ограничивать график повторяемости справа и определить $M_{\max}$ и частоту максимальных землетрясений, характеризующих долгосрочную сейсмическую опасность. Последние при оценке сейсмической опасности, как правило, не рассматриваются как маловероятные события, что является одной из причин пропуска цели – проявления сильных землетрясений в прогнозных зонах с более низкой сейсмической опасностью.

ВКЛАД ГИДРОИЗОСТАЗИИ В СЕЙСМИЧНОСТЬ НА ПРИМЕРЕ ЮГА О. САХАЛИН

Булгаков Р. Ф.

*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия;
e-mail: r.bulgakov@imgg.ru*

Особенностью сейсмичности в южной части Сахалина является высокая современная сейсмоактивность западнее Сахалина, на акватории Татарского пролива и Японского моря и практическое отсутствие сильных событий на Апеловском разломе, который выделяется по Сусунайской долине вдоль Западно-Сахалинского хребта.

Орография Сахалина определила фациальные особенности отложений голоцена и отложений конца позднечетвертичного времени. В северной части Сахалина осадки этого возраста представлены песчаными, супесчаными разностями (пониженная энергия водотоков), в южной части Сахалина, в Сусунайской долине, в разрезах этого возраста преобладают галечники (энергия водотоков высокая).

Возраст галечников аллювиально-пролювиального происхождения варьирует от 10 до 40 тыс. лет назад, т.е. это возраст холодной фазы последнего ледникового периода. Характерно, что эти слои порваны в результате подвижек по Апеловскому разлому, и очевидно, что образовались позже, т.е. уже после окончания ледникового периода, во время послеледниковой трансгрессии Мирового Океана, с подъемом уровня с отметки минус 120 метров до современного уровня.

Трансгрессивное увеличение водной нагрузки на дно вызывает гидроизостатический эффект в результате которого прибрежные районы испытывают динамические воздействия.

Результаты численного моделирования подтверждают возможность активизации сейсмичности в результате изменения послеледниковой нагрузки на дно.

Послеледниковая активность Апеловского разлома может быть связана с гидроизостатическим воздействием, которая к настоящему времени, хотя и сохраняется, но сократилась и соответственно, уменьшила свою активность.

АНАЛИЗ ДАННЫХ КАТАЛОГА ISC ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ТУРКМЕНИСТАНА С 1964 ПО 2021 ГГ.

Бурмин В.Ю.¹, Петросян Г.Р.²

^{1,2} – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: vburmin@yandex.ru*

Наиболее полное освещение сейсмичности Туркменистана за последние годы даётся в периодическом издании Единой геофизической службы Российской академии наук «Землетрясения Северной Евразии». Например, в одном из последних изданий за 2023 год [1]. По геологическим и сейсмотектоническим признакам территория Туркменистана можно разделить на три района: Прикопетдагский район (Центральная Туркмения); Красноводский район (Западная Туркмения); Восточная Туркмения [2]. Согласно результатам наблюдений за землетрясениями наиболее высокая сейсмическая активность отмечается районы Западной Туркмении, Ашхабадский и граничащий с ним на юге Ширван-Кучанский район (провинция Хорасан) в Северном Иране [3].

Сравниваются распределения гипоцентров землетрясений Туркменистана по данным каталога ISC за период с 1964 г. по 2021 г. и результаты пересчёта гипоцентров по данным бюллетеня ISC этот же период. Всего каталог ISC за указанный период содержит около 6000 событий с магнитудой больше 2,5. Авторами пересчитаны гипоцентры чуть больше 2100 землетрясений. Показано, что глубины очагов землетрясений в рассматриваемых районах могут располагаться на глубинах до 500 км (возможно до 600 км, в зависимости от выбранной скоростной модели региона), в то время как по данным каталога ISC максимальные глубины очагов не превосходят 100 км.

Одним важных вопросов при интерпретации данных землетрясений является вопрос выбора скоростной модели региона или годографа сейсмически волн. В [1] в качестве скоростной модели земной коры для Копетдагского региона Туркменистана принимаются модели, приведенные работе [4]. Нами эти модели продолжены на большие глубины путём обращения годографов от глубоких землетрясений [5, 6]. Сравнение результатов расчётов теоретических годографов для некоторых глубоких землетрясений по данным каталога ISC и данным, полученным после пересчета координат этих землетрясений, показало, что очаги многих землетрясений с глубиной 0 км на самом деле расположены на достаточно больших глубинах (от 100 км до 500 км).

1. Сарычева Г. Ч., Петрова Н.В., Безменова Л.В. Сейсмичность Копетдагского региона в 2018-2019 гг. // Землетрясения Северной Евразии. 2023. Вып. 26. С. 92-101.

2. Сейсмичность Туркмении. – Отв. Редактор Непесов Р.Д. Изд. «Ылым». 1968. 201 с

3. Рустанович Д. Н. Сейсмичность территории Туркменской ССР и Ашхабадское землетрясение 1948 г. // Вопросы инженерной сейсмологии. 1967. Вып. 12. 95 с.

4. Рахимов А. Р., Славина Л. Б. Региональный годограф Копетдагской сейсмической зоны. // Изв. АН ТССР. Сер. ФТХиГН. 1984. №3. С. 31-38.

5. Бурмин В. Ю. Некоторые обратные задачи сейсмологии. Теория, эксперименты, результаты. М.: Наука. 2019. 276 с.

6. Бурмин В.Ю., Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А. Регистрация локальных землетрясений под Удинскими вулканами (Камчатка) региональными и временными сейсмическими станциями. Уточнение скоростной модели путём обращения годографа от глубинного источника // Сейсмические приборы. 2019. Т. 55, № 3. С.48–60.
<https://doi.org/10.21455/si2019.3-3>

ТЕКТОНИЧЕСКИЙ ФАКТОР ЛОКАЛИЗАЦИИ ЭНДОГЕННЫХ РУД

Васильев Н. Ю.¹, Мострюков А. О.², Петров В. А.³

¹ – Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, г. Москва, Россия; e-mail: geostress@mail.ru

^{2,3} – ГО «Борок» Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

В докладе рассмотрена история циклического развития тектонической структуры эндогенных месторождений, устойчиво контролируемая последовательной, - инверсионной сменой кинематических (-сброс-сдвиг-взброс-) механизмов деформационного процесса. Показано, что дискретное строение рудного поля (его дифференциация на рудные тела и горные породы, вмещающие эти тела) хорошо описывается изменчивостью кинематических механизмов процесса на рудном этапе формирования месторождений. Эти описания, - суть реконструкции параметров осей тектонических напряжений/деформаций, знаков и величин коэффициентов Лоде-Надаи, а также знаков и величин приращения вертикальных компонент деформаций. По результатам реконструкций сделан вывод о механизме объемного деформационного разуплотнения горных пород, как главном механизме структуризации горных пород в процессе формирования среды эндогенного рудообразования. Физический смысл такого процесса заключается в увеличении площади контакта рудоносных флюидов с вмещающими горными породами и механической (тектонической) активизации этих контактов на рудном этапе формирования эндогенного месторождения. Такой вывод полностью согласуется с одной из важнейших закономерностей химической кинетики - зависимостью количества продукта химической реакции от площади контакта взаимодействующих реагентов. Все реконструкции, рассмотренные в докладе, выполнены по методике кинематического анализа, трансформированной авторами доклада в алгоритмы компьютерных программ. Это, конечно, значительно интенсифицировало выполнение представленной работы, основанной на полевых данных тектонических бороздах скольжений.

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И РЕЗУЛЬТАТОВ GPS МОНИТОРИНГА

Виляев А. В.

ТОО «Национальный научный центр сейсмологических наблюдений и исследований», г. Алма-Ата,
Казахстан; e-mail: vilayev@gmail.com

Тянь-Шань представляет собой сейсмически активный внутриконтинентальный горный пояс, который простирается на 2500 км в направлении ВСВ-ЗСЗ к северу от Таримской котловины. Этот пояс определяется многочисленными надвиговыми разломами простирающимися с востока на запад, создающими компрессионный бассейн и ландшафт хребта. Реконструкция напряженно-деформированного состояния коры выполнена по алгоритму МКА в комплексе программ STRESSseism [1]. Использованы каталоги механизмов очагов: каталог СОМЭ ННЦСНИ МЧС РК, ISC (isc.ac.uk), GCMТ (globalcmt.org), Neis (usgs.gov). Всего 600 определений фокальных механизмов землетрясений с $M > 3.5$ с 1969.01.01 по 2024.01.31. Исходными GPS данными послужили RINEX файлы режимных наблюдений (2009-2020 гг.) непрерывно действующих станций Алматинского прогностического полигона и опорных станций сети IGS, расположенных территориально по периметру района исследований, а также опубликованные измерения скоростей современных движений за последние 16 лет в Центральном Тянь-Шане [2]. Обработка GPS-измерений выполнена с использованием комплекса программ GAMIT/GLOBK [3] в системе отсчета IGS14_EURA. Вычисления НДС коры по GPS данным рассчитаны собственными программами в соответствии с теорией [4].

Региональные напряжения связаны со столкновением Индийской и Евразийской плит. Геодинамический тип напряженного состояния соответствует режиму горизонтального сжатия с подвижками взбросового типа. Ориентации осей главных деформаций по GPS данным показывает преимущественно субширотное направление линейных растяжений в пределах центральной части Северного Тянь-Шаня. Ориентация осей объемных сжимающих деформаций меняется от северо-восточной на западе к меридиональной в центральной части и к северо-западной на восточном фланге. Среднее значение коэффициента Лодэ-Надаи близко к чистому сдвигу, что характерно для зон субдукции. Максимальное касательное напряжение определяет условия сдвиговых движений земной коры преимущественно северо-восточного простираения. Эпицентры сильнейших землетрясений контролируются границей минимальных значений сдвиговых деформаций и приурочены к максимальным градиентам изменения данного параметра, что соответствует режиму накопления деформаций понижающих сдвиговую прочность пород, т.е. зонами разгрузки напряжений. Предложен комплексный параметр (C_{prx}), определяемый суммой нормированных на максимальное значение кулоновых напряжений и отношения максимальных касательных напряжений к эффективному давлению. Большая величина C_{prx} означает, что в выделенных областях имеются аномальные условия для развития опасных процессов. Результат применим для уточнения среднесрочного прогноза землетрясений.

1. Ребецкий Ю. Л. Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов. Научное издание/ — М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. - 406 с.: ил.

2. Zubovich, A. V., et al. GPS velocity field for the Tien Shan and surrounding regions // Tectonics. 2010. 29. TC6014, doi: 10.1029/2010TC002772.

3. Herring T. A., King R. W., McClusky S. C. GAMIT GPS Analysis at MIT // Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology, Cambridge. 2010A

4. Jaeger J. C., Cook N. G.W. Zimmerman R. W. Fundamentals of Rock Mechanics. — 4th ed. — Blackwell Publishing, 2007. — P.360.

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ЗОНАХ СУБДУКЦИИ

Владимирова И. С.

*Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: ir.s.vladimirova@yandex.ru*

Концепция «сейсмических циклов» основана на представлении о квазипериодическом повторении сильнейших землетрясений в одном и том же месте. На протяжении сейсмического цикла очень длительная стадия накопления упругих напряжений сменяется почти мгновенной разрушительной сейсмической стадией. За землетрясением следуют постсейсмические процессы, энергия которых может быть сопоставима с энергией основного толчка. Однако высвобождение энергии во время постсейсмических процессов существенно растянуто во времени и, как правило, не наносит явного ущерба. Изучение пространственно-временной эволюции геодинамических процессов в очаговых зонах сильнейших землетрясений на разных стадиях сейсмического цикла крайне важно для понимания поведения сейсмогенерирующих разломов и корректной оценки сейсмической опасности. Наиболее очевидная сложность, связанная с изучением сейсмических циклов сильнейших землетрясений, состоит в том, что их длительность (сотни и даже тысячи лет) многократно превосходит длительность периода инструментальных сейсмологических и спутниковых геодезических наблюдений. А значит, необходим совместный анализ данных сразу из нескольких сейсмоактивных регионов. К таким регионам в первую очередь относятся зоны субдукции, в которых происходят практически все сильнейшие землетрясения с $M \geq 8$.

В докладе приведены результаты исследования сейсмических циклов сильнейших землетрясений, произошедших в Курило-Камчатской, Чилийской, Японской и Алеутской зонах субдукции в начале XXI в., на основе комплексного анализа спутниковых геодезических, сейсмологических и геологических данных. Выявлены явные пространственные взаимосвязи между геодинамическими процессами, протекающими на разных стадиях сейсмического цикла. Показано, что структурные неоднородности геосреды различного генеза оказывают непосредственное влияние на процессы накопления и высвобождения упругих напряжений.

ПРИЧИНА ДЕФОРМАЦИЙ ЗАПАДНОГО СКЛОНА ВУЛКАНА ШИВЕЛУЧ, ВЫЯВЛЕННЫХ МЕТОДАМИ РСА ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ В ПОСТПАРОКСИЗМАЛЬНУЮ ФАЗУ ИЗВЕРЖЕНИЯ 11.04.2023

Волкова М. С.¹, Михайлов В. О.², Горбач Н. В.³

^{1,2} – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия;
e-mail: msvolkova6177@gmail.com*

³ – *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия*

Деформации земной поверхности в районе вулканических массивов могут быть следствием активного перемещения магмы в земной коре. Регистрация смещений на склонах вулканов, в том числе, методами спутниковой радарной интерферометрии, позволяет исследовать процессы, происходящие в вулканической постройке. Интерпретация измеренных деформаций с помощью моделирования процесса внедрения магматического материала в постройку вулкана позволяет оценить масштабы, глубину залегания и физические параметры источника.

Мощное извержение вулкана Шивелуч, которое произошло 11 апреля 2023 года, стало сильнейшим в числе его извержений за последние 60 лет. Поля смещений, рассчитанные методом дифференциальной интерферометрии (DInSAR) по снимкам спутника Sentinel-1, выявили чёткий подъём куполообразной формы на западном склоне вулкана в 8.5 км от его активного кратера. Рост купола проявился в постпароксизмальную фазу и особенно интенсивно фиксировался на интервалах спутниковой съёмки 01.05-13.05.2023, 13.05-25.05.2023 и 25.05-06.06.2023. Сопоставление положения поля смещений на склоне с топографией склона показало, что наблюдаемые смещения не могут быть вызваны перемещением материала по склону в результате оползневых или эрозионных процессов. Для проверки гипотезы о формировании области поднятия в результате внедрения магмы под западный склон вулкана было проведено численное моделирование и определены параметры магматического тела в форме силла, которое создает на поверхности смещения, наилучшим образом соответствующие смещениям, наблюдаемым по данным спутниковой радарной интерферометрии. Анализ миграции очагов землетрясений позволяет заключить, что после извержения 11.04.2023 магма поднялась с глубины 20-25 км по образовавшейся под западным склоном вулкана трещине и внедрилась горизонтально под склон на глубине 1-2 км в северном – северо-западном направлении. В пределах точности данных о смещениях поверхности, размеры магматического тела меняются от 6.0 x 3.0 км на глубине 1 км, до 5.25 x 1.4 км на глубине 2 км, при этом его высота составляет от 0.5 до 1.75 м, а объём от 0.009 до 0.0129 км³.

В результате, на основе данных спутниковой радарной интерферометрии в комплексе с данными о распределении сопровождавшей движение магмы сейсмической активности, построена модель магматической интрузии, образовавшейся под западным склоном вулкана в постпароксизмальную фазу извержения 11.04.2023. В то же время, формирование в конце апреля 2024 г. на западном склоне вулкана Шивелуч нового экструзивного купола подтверждает гипотезу о подъёме магмы под западный склон вулкана и позволяет оценить скорость подъёма магмы к поверхности.

ПОСТРОЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ПРОГНОЗ ЗОН РАЗВИТОЙ ТРЕЩИНОВАТОСТИ НА ОДНОМ ИЗ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Воронов И. А.¹, Дубиня Н. В.²

^{1,2} – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, ИФЗ РАН, Московский физико-технический институт, г. Москва, Россия; e-mail: ivanvoronov1996@yandex.ru*

В докладе представлены результаты работ по анализу естественной трещиноватости на одном из нефтегазовых месторождений Западной Сибири с использованием подходов геомеханического моделирования. В качестве входных данных для геомеханического моделирования использовались каротажные данные, лабораторные исследования керна, конструкция, инклинометрия, литология, стратиграфия, имиджеры и другие данные по группе скважин месторождения.

В работе геомеханическое моделирование было проведено за два этапа – одномерное и трехмерное моделирование. Одномерное геомеханическое моделирование (1D) основано на аналитических решениях задачи о напряжённо-деформированном состоянии пласта или ствола скважины. Оно подразумевает расчёт механических свойств пород в виде профилей вдоль ствола скважины. Соответствующая модель механических свойств была построена по результатам комплексирования разномасштабных данных – результатов геофизических исследований скважин и лабораторных экспериментов на образцах керна. По данным модели механических свойств были восстановлены профили напряжений с использованием данных о вывалообразовании и прямых тестов по определению минимального главного напряжения для калибровки граничных условий.

Трёхмерное геомеханическое моделирование (3D) решает тот же класс задач, но в условиях произвольной расчленённости и геометрии залегания, в том числе при наличии разного рода тектонических нарушений. По результатам этого моделирования были получены пространственные модели механических свойств и параметров напряженно-деформированного состояния, которые позволяют смоделировать трещиноватость в объеме месторождения. В области скважин определяются пространственные ориентации, линейные размеры трещин и другие параметры, использующиеся для калибровки и верификации модели трещиноватости. Верифицированный алгоритм использован для прогноза свойств естественных трещин в межскважинном пространстве.

Результаты работы будут в дальнейшем использованы для оптимизации разработки месторождения с учетом определенных параметров естественных трещин.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОГО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ НЕУПРУГОГО РАЗРУШЕНИЯ ВОКРУГ СТВОЛА СКВАЖИН И МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Гараванд А.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: garavand@ifz.ru

Точная оценка тензора напряжений имеет ключевое значение для решения проблем, возникающих при разработке нефтегазовых месторождений. Два из трёх компонентов - вертикальное напряжение (σ_v) и минимальное горизонтальное напряжение (σ_h) - могут быть вычислены прямыми методами. В то же время последний и самый сложный компонент, максимальное горизонтальное напряжение (σ_H), обычно рассчитывается на основе предположений теории упругости и формы разрушения вокруг ствола скважин по данным каротажа. Ввиду обилия данных о кавернах ствола скважин, методы, основанные на форме каверн, получили в профессиональном сообществе высокое признание. Однако согласно полевым наблюдениям, подобные каверны часто возникают в слабых слоях, что противоречит предположениям теории упругости. Кроме того, нахождение согласованной связи между формой каверн и условиями нагрузки остаётся основной проблемой для таких подходов. Учитывая все вышесказанное, в данной работе с помощью моделирования зоны обрушения ствола скважин с учётом неупругой деформации были смоделированы инициализация и развитие процесса до стабилизации.

СЕЙСМИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ, ДИССИПАЦИЯ И ПАРАМЕТРЫ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Гарагаш И. А.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: garagash@ifz.ru

Рассмотрена модель активации разлома, представленного упругопластическим слоем конечной толщины, для определения условия при котором система переходит в несмежную форму равновесия. Динамический переход описывается убегаящей неустойчивостью в очаге землетрясения, представляющего собой узкое эллипсоидальное включение, находящееся в упругой среде. Момент перехода включения на новый уровень сопровождается выделением энергии, которая расходуется на разрушение связей и преодоление сил сухого трения, а также частично излучается в виде сейсмических колебаний. Выведено соотношение для плотности сейсмической энергии, связывающее между собой радиус очага землетрясения и его толщину с сейсмическим моментом, упругими свойствами и параметрами прочности. Получено выражение для коэффициента излучения сейсмических волн или иначе сейсмического к.п.д.. Найдено выражение для диссипации механической энергии в очаге землетрясения и изучен связанный с этим нагрев вмещающей среды.

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ПОКМАРКОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ РАЗЛОЖЕНИЯ ГАЗОГИДРАТОВ

Гарагаш И. А.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: garagash@ifz.ru

Выполнен анализ образования покмарков - кратероподобных углублений на морском дне, возникающих в результате разложения газогидратов. Создана геомеханическая модель формирования покмарков. Процесс разрушения и образования покмарков происходит в среде, поведение которой описывается моделью нелинейной ползучести в сочетании с критерием прочности, зависящим от внутреннего трения. Используются определяющие соотношения для упруго-вязко-пластической среды со степенным законом ползучести, зависящим от температуры. Для описания разрушения среды используется закон неассоциированного пластического течения с предельным условием Друкера-Прагера и разупрочнением. Разупрочнение ведет к развитию неустойчивости вязкопластического течения и локализации сдвиговой деформации в узких зонах, по которым и происходит разрушение. Анализ развития деформаций и напряжений в осадочной толще при увеличении порового давления, вызываемого разложением газогидратов, показал, что интенсивность сдвиговой деформации локализуется на внутреннем контуре куполовидной покрывки. В результате формируется коническая узкая зона. После ее выхода на поверхность сцепление падает до нуля и сила, создаваемая давлением, выталкивает материал на поверхность, завершая образование кратера. Время формирования конической поверхности зависит от порового давления во включении. Если давление не превышает критического значения, то напряжения в покрывке не достигают предела прочности, поверхность разрушения не формируется и покмарк не образуется.

ДЕФОРМАЦИИ РЕЛЬЕФА И ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ГРЯЗЕВОГО ВУЛКАНИЗМА

Глазырин Е. А.

АО "Южморгеология", г. Геленджик, Россия; e-mail: eaglazyrin@mail.ru

Грязевой вулканизм в ареалах своего развития играет значительную роль в структурообразовании - формировании рельефа и деформации, преобразовании геологического разреза. В основе сообщения лежат материалы по Керченско-Таманской грязевулканической провинции, полученные АО «ЮЖМОРГЕОЛОГИЯ» в 2009-2023 годах по программам государственного мониторинга состояния недр и геологического картирования акватории Азовского и Черного морей, инженерным изысканиям, а также анализ многочисленных научных публикаций, в том числе по другим регионам мира.

Кратко рассмотрены выделяемые на современном этапе изученности генетические типы грязевого вулканизма (классический, газогидратный, серпентинитовый) и их отличительные особенности по деформации рельефа и геологического разреза. В сообщении более детально рассматриваются деформации рельефа и геологического разреза под действием классического типа грязевого вулканизма на примере грязевулканических полей и грязевых вулканов Керченско-Таманского региона.

Показано, что собственно грязевулканические процессы формируют рельеф как в виде тектонических деформаций (от положительных на подготовительной и активной стадии, до отрицательных - на заключительной), так и аккумулятивных (грязевулканические постройки - сопки, сальзы, грифоны). Сами грязевулканические процессы служат отчасти следствием региональных тектонических движений (диапиризм, субгоризонтальные тектонические сжатия) и процессов. Собственно, грязевулканические процессы активно нарушают сплошность геологического разреза в форме систем разломов, каналов газо-флюидной разгрузки, кальдерных нарушений, непунических даек. В процессе развития (эволюции) геотектонической структуры происходит миграция грязевулканической активности от ее центра на периклиналь и крылья структуры. Отличительной особенностью грязевулканических полей по отношению к окружению служит также более активное развитие экзогеодинамики.

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ЮЖНОЙ ЧАСТИ ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА ПО НОВЫМ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Гоев А. Г.¹, Алешин И. М.², Резниченко Р. А.³

^{1,3} – *Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, г. Москва, Россия;
e-mail: goev@idg.ras.ru*

^{1,2} – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

Дальневосточный регион, с его обширными природными и людскими ресурсами, а также развивающейся нефтегазовой и рудной промышленностью, является наиболее сейсмоактивным в Российской Федерации. С тектонической точки зрения, он представляет собой активную континентальную окраину и геодинамические процессы, происходящие в нем, во многом контролируются субдукцией Тихоокеанской плиты под Евразийскую.

Долгое время исследования глубинного строения Курило-Камчатской зоны субдукции сдерживалось отсутствием качественных сетей сейсмических станций. По этой причине наши знания на данный момент ограничиваются данными лишь нескольких профилей МОВЗ и ГСЗ. За последние годы сейсмическая сеть, созданная Единой геофизической службой РАН на полуострове Камчатка, существенно расширилась и представляет собой площадную систему из более чем 20 широкополосных сейсмических станций, работающих не менее десяти лет каждая.

В докладе представлены результаты моделирования глубинного скоростного строения земной коры и верхней мантии (до глубин около 300 км) южной части полуострова Камчатка методом функций приемника на основе анализа обменных волн (как P-S так и S-P), формирующихся на контрастных сейсмических границах вблизи регистрирующих станций. Отдельное внимание в работе уделено вопросам эмпирического подтверждения корректности применения метода функций приемника вблизи зон субдукции.

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИРОДНЫХ МАССИВОВ ПО ДАННЫМ СТРУКТУРНОЙ ГЕОЛОГИИ И БПЛА

Гордеев Н. А.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: gord@ifz.ru

В ходе технологического прогресса к первой четверти 21 века на службе у геологов появились беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Их использование открыло возможности работы с довольно большими и высокими обнажениями без применения альпинизма и риска здоровью специалистов высокого уровня. В настоящей работе будут раскрыты алгоритмы работы с БПЛА, методы обработки полученных данных и результаты тектонофизической интерпретации данных. Итоговая информация пройдет сравнительный анализ с классическим структурно-геологическим подходом.

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ИЗУЧЕНИЮ ЮГО-ВОСТОЧНОГО БОРТА ГОРНОГО АЛТАЯ

Гордеев Н. А.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: gord@ifz.ru

27.09.2003 г. вблизи юго-западной границы Чуйской и Курайской впадин на Юго-Восточном Алтае произошло самое сильное из зарегистрированных в 1991–2022 гг. на континентальной части России Чуйское (Алтайское) землетрясение магнитудой 7.3. Нами проанализирована сейсмичность и составлена схема неотектонических напряжений Чуйско-Курайской впадины и структур обрамления и проведено сравнение современных и неотектонических напряжений Юго-Восточного Алтая. Неотектонические напряжения восстанавливались с помощью структурно-геоморфологического метода реконструкции сдвиговых напряжений. Установлено, что ориентация субгоризонтальной оси сжатия I ранга меняется от меридиональной до север–северо-восточной и северо-восточной. Землетрясение произошло в регионе, в пределах которого крупнейшие разломы I ранга (Курайский и Шапшальский), юг–юго-западная часть доновейшего Чарышско-Теректинского разлома, объединенного нами на новейшем этапе с разломом, ограничивающим Чаган-Узунский блок с юго-востока, в единый региональный разлом I ранга, активизированы на неотектоническом этапе в обстановке дополнительного сжатия. Реконструировано также более крупномасштабное поле напряжений для Чаган-Узунского жесткого блока, разграничивающего Чуйскую и Курайскую впадины, и выделен неотектонический разлом северо-западного простираения, ограничивающий с юго-запада Чуйскую и Курайскую впадины. Разлом, названный нами условно Безымянным, разбит мелкими разломами северо-восточного простираения на три сегмента и входит в состав крупной Южно-Чуйской зоны разломов. По данным о механизмах очагов сильных землетрясений установлено стабильное, как и на неотектоническом этапе, близ горизонтальное положение оси сжатия в исследуемом регионе и принято, что сильные землетрясения происходят в обстановке сжатия. Механизмы землетрясений (преимущественно афтершоков), связанных с Чуйским событием, свидетельствуют о концентрации взбросовых механизмов в пределах Чаган-Узунского приподнятого блока. Это может быть обусловлено продолжающимся воздыманием Чаган-Узунского блока на современном этапе. Механизмы очагов землетрясений, располагающихся вдоль разлома Безымянный преимущественно сдвиговые. Это результат образования сдвигового поля при сдвиговом смещении по разлому во время землетрясения. Крупнейшие сейсмические события происходят преимущественно в обстановке сжатия. Таким образом, результаты сопоставления неотектонических и современных напряжений на территории Чуйско-Курайской впадины показывают, что Чуйское землетрясение обусловлено обстановкой как регионального, так и локального субгоризонтального сжатия.

БЛОКОВОЙ СТРОЕНИЕ АРХАНГЕЛЬСКОЙ АЛМАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ ПО ДАННЫМ МЕТОДА МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Данилов К. Б.

*ФИЦ комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаврова УО РАН, г. Архангельск,
Россия; e-mail: danilov_kostea@mail.ru*

По запасам алмазов Архангельская алмазоносная провинция (ААП) является второй в России. Отдельные структурные элементы перспективны на нефтегазоносность. Также для ААП характерна сейсмическая активность. Перечисленные факты указывают на необходимость исчерпывающей информации о глубинном строении данного региона. В данной работе представлены результаты глубинных исследований по методу микросейсмического зондирования. Исследования проведены вдоль трех профилей общей протяженностью 220 км. Для достоверного анализа проведено сопоставление результатов с данными ГСЗ и ОГТ. По результатам анализа выделена симметричная блоковая структура. Так на окраинах Лапландско-Кольско-Двисского орогена выделены два низкоскоростных блока образующих сводовые структуры, направленные друг к другу. Проведенный анализ показал, что вероятной причиной образования данной структуры мог служить рост коры в центральной части орогена. Кроме того, известные месторождения алмазов Архангельской алмазоносной провинции расположены в смежных блоках с северным низкоскоростным блоком орогена. Вероятно, выделенный низкоскоростной блок на борту орогена является ослабленной зоной, по которой происходил подъем кимберлита на поверхность. При этом уникальной особенностью блока вмещающего месторождение Ломоносова является наличие выраженной горизонтальной слоистости верхней коры. Таким образом, совместный анализ пассивных и активных сейсмических методов позволяет получать важные данные о блоковом строении литосферы исследуемого региона.

Работа выполнена в рамках гранта РНФ № 23-27-10022 «Контролирующие структуры трубок взрыва по данным пассивных сейсмических и радиометрических методов (на примере Архангельской алмазоносной провинции)».

МОДИФИКАЦИЯ ЛИТОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ О ЗАТУХАНИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

Добрынина А. А.¹, Саньков В. А.²

^{1,2} – *Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия; e-mail: scisecretary@crust.irk.ru*

¹ – *Геологический институт им. Н. Л. Добрецова СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия*

В работе изучались особенности затухания сейсмических волн (коэффициент затухания (δ), сейсмическая добротность (Q) и ее зависимость от частоты (частотный параметр n), сведения о вкладе двух компонент затухания (Q_i и Q_{SC}) в общее затухание (Q_T) и их пространственно-временные вариации) в литосфере трех внутриконтинентальных зон растяжения литосферы, характеризующихся своими особенностями: Северо-Танзанийская дивергентная зона – СТДЗ (область активного вулканизма), Провинция Бассейнов и Хребтов – ПБХ (высокая степень растяжения литосферы и утонение коры до 25 км) и Байкальская рифтовая система – БРС. СТДЗ и БРС приурочены к границам крупных тектонических блоков с мощной литосферой – Сибирского и Танзанийского кратонов соответственно. По степени растяжения БРС сопоставима с СТДЗ, но в ней отсутствуют проявления активного современного вулканизма. Оценка затухания сейсмических волн в литосфере выполнялась для прямых продольных (P) и поперечных (S) волн и сейсмической коды.

Полученные значения сейсмической добротности показывают высокую зависимость от частоты и длины окна обработки коды. Наблюдаемое увеличение добротности с увеличением длины окна обработки коды может быть интерпретировано как проявление уменьшения затухания с глубиной, связанное с большей консолидацией среды на глубине. Сопоставление глубинных вариаций коэффициента затухания и частотного параметра со скоростным строением регионов говорит о приуроченности вариаций затухания к скоростным границам в среде. Оценки внутреннего затухания и затухания вследствие рассеяния сейсмических волн на неоднородностях среды показали, что для всех регионов наибольший вклад в общее затухание вносит внутреннее затухание. Полученные характеристики затухания сейсмических волн для трех разных рифтовых систем в основном согласуются между собой, что может свидетельствовать о сопоставимых по уровню процессах модификации литосферы в разных зонах растяжения континентальной литосферы. В то же время нельзя не отметить высокое значение внутреннего затухания в литосфере СТДЗ. Как уже упоминалось, этот рифт характеризуется современной вулканической активностью, что приводит к повышенной флюидизации земной коры, присутствию магматических очагов и каналов. Высокие значения внутреннего затухания вполне логично связывать с этим процессом. Таким образом, можно заключить, что характеристики затухания сейсмических волн и их вариации могут использоваться в качестве интегральных параметров для оценки степени модификации литосферы.

ПРЯМЫЕ И ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ИЗУЧЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОЙ ТРЕЩИНОВАТОСТИ В ГЕОМЕХАНИКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ

Дубиня Н. В.¹, Тихоцкий С. А.²

^{1,2} – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, ИФЗ РАН, Московский физико-технический институт, г. Москва, Россия; e-mail: Dubinya.NV@gmail.com*

В докладе представлен обзор развиваемых авторами решений в области анализа естественной трещиноватости горных пород с позиций геомеханики месторождений углеводородов. Продемонстрированы решения ряда прямых и обратных задач геомеханики с использованием тектонофизических подходов.

Под прямыми задачами анализа трещиноватости применительно к геомеханике месторождений углеводородов понимаются прогнозы различных свойств естественной трещиноватости пород-коллекторов на основании анализа разномасштабных геофизических исследований и геомеханического моделирования. В докладе представлен метод прогноза пространственных ориентаций естественных трещин сдвига, развивающихся в образцах горных пород при известном механическом нагружении, основанный на интерпретации результатов лабораторных экспериментов с использованием неассоциированного закона пластического течения. Продемонстрировано, что известная по лабораторным экспериментам связь между напряжениями и деформациями образцов горных пород может быть использована для определения распределения естественных трещин в образце по пространственным ориентациям. Представлен подход к ремасштабированию таких результатов для прогноза свойств естественной трещиноватости на масштабах, характерных для геофизических исследований скважин и сейсмических исследований. Предложен подход к построению динамической модели естественной трещиноватости, допускающий анализ изменений свойств естественных трещин в ходе разработки месторождения. Сформулирован алгоритм прогноза флюидопроводимости естественных сдвиговых трещин по результатам геомеханического моделирования в отсутствие ряда предположений, часто используемых в геомеханике месторождений углеводородов. Продемонстрированы результаты применения предложенного подхода для построения модели естественной трещиноватости на участке одного из нефтегазовых месторождений Российской Федерации.

К обратным задачам относится реконструкция отдельных параметров, характеризующих механические свойства и напряженное состояние массива горных пород, на основании анализа естественных трещин. В докладе представлен подход к оценке напряженного состояния горных пород на основании концепции критически напряженных трещин, детально рассмотрены вопросы существования, единственности и устойчивости решения обратной задачи с использованием синтетических данных, выполнен факторный анализ. Продемонстрирована возможность совместной реконструкции шести независимых компонент тензора природных напряжений и коэффициента трения среды. Представлены результаты применения предложенного подхода для реконструкции механических свойств и напряженного состояния горных пород в нескольких регионах Земли, отвечающих различным геологическим и тектоническим условиям, приведена верификация результатов путем сравнения с независимыми исследованиями.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ В ГРАНИТОИДЕ

Дьяур Н. И.¹, Чистякова А. В.², Багдасарян Т. Э.³, Егоров Н. А.⁴

^{1, 2, 3, 4} – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: dyaur@ifz.ru*

Проведены эксперименты с циклами нагрузка-разгрузка при одноосном сжатии призматического образца гранитоида 20 x 20 x 60 мм с деформированием в конечном цикле до разрушения. В каждом цикле максимальная нагрузка повышалась. Скорость деформации сохранялась постоянной $2.5 \cdot 10^{-6}$ в режиме strain-control. Между циклами деформирования на установке GCTS RTR-4500 проводили сканирование двух граней на СЭМ TESCAN MIRA IV LMS.

Результаты мониторинга СЭМ показали, что кроме межзеренных и трансгранулярных трещин, зафиксированных в результате формирования разрыва образца, важным фактом является и обнаружение сформированных микротрещин в отдельных минералах образца гранитоида, которые зависят от таких свойств минералов, как спайности, анизотропии. Наблюдения акустической эмиссии свидетельствуют о развитии трещинообразования в образце уже на начальных этапах упругого деформирования. Однако сканирование при дискретном мониторинге СЭМ было возможно только на поверхности образца. Преимущество метода заключалось в возможности сравнения одних и тех же фрагментов поверхностей после любой стадии деформирования.

В работе [Веттегрень и др., 2012] было показано, что при ударе в зернах минералов плагиоклаза, калиевого ПШ появляются микротрещины, и в доказательство приводятся совпадение максимумов сигналов фрактолюминесценции с колебаниями в образце гранита. В наших наблюдениях после циклов нагружения и разрыва выявилось, что у части минералов с совершенной спайностью (биотит, плагиоклаз, КППШ) обнаруживаются микротрещины, развитые по спайности. Формируются микротрещины спайности как правило в пределах зерна минерала, исключая случаи роста больших трансгранулярных трещин.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЙ ЗОЛОТОГО ОРУДЕНЕНИЯ АУМИНЗАТАУ-БЕЛЬТАУСКОГО РУДНОГО РАЙОНА

Жанибеков Б. О.¹, Уматов Н. Ф.², Турапов М. К.³, Беркинов Н. А.⁴

¹ – *Ташкентский Государственный технический университет имени Ислама Каримова, г. Ташкент, Республика Узбекистан; e-mail: jonibekovbobur@mail.ru*

^{2,3,4} – *ГУ «Институт минеральных ресурсов», г. Ташкент, Республика Узбекистан*

В работе отмечается, что в различные годы в Центральных Кызылкумах в широком масштабе были проведены как на региональном, так и на локальном уровне геофизические исследования. Эти работы позволили создать модель: петрофизических особенностей геологических образований; глубинного строения региона; размещения интрузивных образований на глубине. Определена позиция рудного района по региональным геофизическим аномалиям. Установлена взаимосвязь геофизических аномалий и магматических образований. Разработана геофизическая модель возвышенности Бельтау.

ДИНАМИКА АФТЕРШОКОВ СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ: К 130-ЛЕТИЮ ЗАКОНА ОМОРИ

Завьялов А. Д.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: zavyalov@ifz.ru

130 лет тому назад, в 1894 г. был сформулирован первый закон физики землетрясений, широко известный как закон Омори. Он устанавливал, что частота афтершоков землетрясения в среднем гиперболически убывает с течением времени. Это открытие стало эпохальным и на многие десятилетия определило направление исследования потока афтершоков. Данный доклад посвящен юбилею выдающегося открытия. Основное внимание в нем сосредоточено на одном из современных направлений развития феноменологической теории афтершоков. В отличие от Омори, который использовал алгебраическую формулу для выражения закона, мы положили в основу теории дифференциальное уравнение эволюции очага после образования в нем магистрального разрыва сплошности горных пород. Важное свойство нашего уравнения в том, что его решение полностью эквивалентно закону Омори. Оказалось, что дифференциальный подход, отличный от алгебраического подхода Омори, позволяет по-новому подойти к обработке и анализу афтершоков. На этом пути был введен феноменологический параметр σ , получивший название коэффициент деактивации очага, который обобщенно характеризует состояние очага. Было обнаружено существование так называемой эпохи Омори, на протяжении которой коэффициент деактивации остается неизменным, а по ее окончании очаг испытывает бифуркацию, обозначающую его переход в иное качественное состояние. Предложенное нами нелинейное уравнение эволюции подсказывает естественные обобщения феноменологической теории. В частности, одно из обобщений, имеющее форму уравнения Колмогорова-Петровского-Пискунова (КПП), позволяет гипотетически связать распространение активности афтершоков с потоком энергии Умова в очаге.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания Института физики Земли имени О. Ю. Шмидта РАН № 075-00693-22-00.

ВЫДЕЛЕНИЕ ЧАНДЛЕРОВСКОГО КОЛЕБАНИЯ ПОЛЮСА ФИЛЬТРАЦИЕЙ КАЛМАНА ВБЛИЗИ РЕЗОНАНСА

Зотов Л. В.¹, Ольховский А.²

¹ – Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия; e-mail: wolftempus@gmail.com

^{1,2} – Московский институт электроники и математики, г. Москва, Россия

Чандлеровское движение полюса (ЧДП) с периодом около 430 суток является собственным колебанием оси вращения Земли. В комплексных дифференциальных уравнениях Эйлера-Лиувилля, описывающих движения полюса, ему соответствует собственная частота, имеющая действительную и мнимую части. Последняя связана с затуханием колебаний, характеризующимся добротностью $Q \sim 100$. ЧДП имеет переменную амплитуду порядка 0.1 сек дуги и почти полностью затухало в начале 1930-х и в 2017-2020-х со сменой фазы на 180° [1]. Исследователей волнует вопрос, является ли такое затухание случайным или детерминированным явлением, обусловленным исчезновением возбуждения от геофизических процессов в океане и атмосфере [2] или его действием в противофазе [3].

В работе [4] с помощью фильтра Калмана мы пытались выделить ЧДП из ряда наблюдений EOP C01 с 1846 года, содержащих годовую осцилляцию и шумы. Были также предприняты попытки восстановить входное воздействие, для чего привлекался корректирующий фильтр Пантелеева в частотной области. В данной работе в качестве фильтра мы используем те же уравнения Эйлера-Лиувилля, усиленные возведением в четную степень их передаточной функции, что устраняет фазовые искажения, и ренормализованные так, чтобы коэффициент пропускания на Чандлеровской частоте был равен единице. Таким образом, мы пытаемся совместить фильтрацию Калмана с дополнительной фильтрацией, чтобы выделить из траектории полюса интересующую нас составляющую - ЧДП.

1. Зотов, Л В., Сидоренков, Н С., Бизуар, К Ж., Аномалии чандлеровского колебания полюса в 2010-е годы, Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. N 3, 2022, с 64.

2. Yamaguchi, R., Furuya, M. Can we explain the post-2015 absence of the Chandler wobble? Earth Planets Space 76, 1, 2024, <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01944-y>

3. Зотов Л.В., Вращение Земли и климатические процессы, монография, МИЭМ ВШЭ, Москва, 2022, ISBN:978-5-600-03155-5

4. Зотов Л.В., С.А. Баринаева, И.А. Гаража, Регуляризованный фильтр Калмана в приложении к Чандлеровскому движению полюса, Сборник 49-й Международной конференции им. Успенского-Страхова, Екатеринбург, 2023 с. 165-169

НЕПОЛНЫЕ СИММЕТРИЧНЫЕ ТРИАДЫ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Зотов О. Д.¹, Гульельми А. В.², Завьялов А. Д.³, Клайн Б. И.⁴

^{1, 2, 3, 4} – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН ГО «Борок», г. Борок, Россия;
e-mail: ozotov@inbox.ru*

Триадой тектонического землетрясения мы называем естественное триединство форшоков, главного удара и афтершоков. Мы произвели систематику триад. Все триады делятся на три класса: классические, зеркальные и симметричные триады. Каждый класс подразделяется на два вида: полная или неполная триада. В ходе классификации мы обнаружили необычные триады, относящиеся к виду неполных симметричных. Они были названы нами *Grande terremoto solitario*, или сокращенно GTS. Отличительная особенность GTS состоит в том, что главному удару не предшествуют форшоки, и афтершоки отсутствуют после главного удара в течение, по меньшей мере, суток до и после главного удара соответственно. Предварительному описанию GTS посвящено данное сообщение. Наш интерес к GTS связан с тем, что они составляют примерно половину всех главных ударов с магнитудами $M \geq 6$. Представлены распределения GTS по магнитудам, по глубинам гипоцентров, а также распределение эпицентров по земной поверхности. Показано существенное отличие GTS от других главных ударов. Указана определенная аналогия между GTS и «волнам-убийцам» в океане.

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

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ АКТИВНЫХ РАЗЛОМОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИИ УЗБЕКИСТАНА

Ибрагимов Р. С.¹, Ибрагимова Т. Л.², Мирзаев М. А.³, Ашуров С. Х.⁴

^{1, 2, 3, 4} – *Институт сейсмологии Академии наук республики Узбекистан, г. Ташкент, Республика Узбекистан; e-mail: ibrroma@yandex.ru*

При вероятностном анализе сейсмической опасности территории Узбекистана в качестве одной из моделей сейсмических источников использовалась модель активных разломов земной коры. Для ее построения использована база данных активных разломов Евразии (Active Fault Database of Eurasia - AFEAD) [Zelenin et al, 2022]. Для каждого разлома базы данных AFEAD имеются сведения о его морфологии, кинематике с количественными показателями позднечетвертичных смещений (три ранга). Разломы, присутствующие в базе данных, дифференцированы на 4 класса (А, В, С, D) по степени выраженности (достоверности) проявления современной геодинамической активности – атрибут CONF. Таким образом, база данных AFEAD содержит в себе наиболее полные сведения, необходимые для проведения вероятностного анализа сейсмической опасности.

Для оценки сейсмического потенциала активных разломов используются соотношения, основанные на корреляции величины $M_{\max}$ с геометрическими характеристиками тектонического нарушения (длина разлома L , длина максимального возможного на данном разломе поверхностного разрыва l , отвечающая этой длине ширина разрыва W , площадь максимального поверхностного разрыва $A = l \cdot W$). В нашем исследовании расчетное значение величины $M_{\max}$ для каждого активного разлома земной коры находилось путем усреднения с равными весами оценок сейсмического потенциала по пяти различным зависимостям, полученным в [Leonard, 2014, 2010; Hanks, Bakun, 2008; Wells, Coppersmith, 1994], в которых величина $M_{\max}$ выражается через длину и площадь разрыва. При этом полагалось, что ширина разрыва составляет половину от его длины $W = l / 2$. Поскольку преобладающим кинематическим типом подвижки в очагах землетрясений территории Узбекистана является взброс [Ibragimova et al., 2021; Rebetsky et al., 2020], оценки величины $M_{\max}$ по зависимостям [Leonard, 2014, 2010; Hanks, Bakun, 2008; Wells, Coppersmith, 1994] проводились для данного типа подвижки в очаге. Следует сказать, что длина разрыва l , который может образоваться в случае возникновения землетрясения с максимальной магнитудой $M_{\max}$, составляет лишь определенный процент от всей протяженности разлома L . С увеличением длины разлома это процентное соотношение уменьшается.

Для оценки среднегодовой повторяемости землетрясений различных магнитуд $N(M)$ в модели активных разломов земной коры применялись четыре соотношения, полученные в исследованиях [Youngs, Coppersmith, 1985; Anderson, Luco, 1983] и их программная реализация, описанная в [Bungum, 2007]. Зависимости для оценки повторяемости землетрясений различаются между собой характером высвобождения сейсмического момента, логарифм которого связан с магнитудой землетрясений линейной зависимостью.

С учетом классов достоверности проявления современной геодинамической активности (атрибут CONF в базе данных AFEAD), было рассмотрено три варианта моделей сейсмических источников в виде активных разломов. В первом варианте рассматривались разломы с классами достоверности А и В. Во втором варианте – учитывались разломы классов А, В и С. Наконец, в третьем, наиболее консервативном варианте, рассматривались разломы с классами достоверности А, В, С и D. Каждая из этих моделей вошла в логическое дерево с различными весами.

Модель разломов сама по себе недостаточно полна, чтобы охарактеризовать площадное распределение сейсмической активности в области малых магнитуд. Чтобы дополнить возможные отсутствующие события, в модель разломов добавлен фоновый слой источников, лимитированный максимальной магнитудой $M=5.5$. При этом полагалось, что землетрясения больших магнитуд приурочены к зонам активных разломов и должны фигурировать в базе данных активных разломов.

В качестве законов затухания сейсмических воздействий с расстоянием использовались уравнения движений грунта для неглубокой активной коры, встроенные в программный комплекс CRISIS. Конечным результатом проведенного исследования стало построение карт сейсмического районирования территории Узбекистана в баллах макросейсмической шкалы и в значениях максимальных ускорений колебаний грунта для различных вероятностей не превышения уровня сейсмических воздействий в течение 50 лет.

ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ О. САХАЛИН

Каменев П. А.¹, Маринин А. В.², Сим Л. А.³, Богомолов Л. М.⁴, Лукманов А. Р.⁵,
Дегтярев В. А.⁶

^{1, 4, 6} – *Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия;*
e-mail: p.kamenev@imgg.ru

^{2, 3, 5} – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

Охарактеризована неотектоника, новейшие и современные тектонические напряжения Сахалина. Составлена структурно-геоморфологическая карта, на которой выделены три продольные зоны. Неотектонические напряжения, изученные комплексом тектонофизических и структурных методов на Южном Сахалине, показали, что оси максимальных и минимальных сжимающих главных нормальных напряжений регионального уровня ориентированы преимущественно субгоризонтально. Территория Центрального Сахалина характеризуется преимущественно субвертикальной ориентацией оси максимального сжатия, а также субгоризонтальной и преимущественно субмеридионально направленной осью минимального сжатия (растяжения). Главной выявленной особенностью Центрального Сахалина является преобладание для всей его территории горизонтального растяжения как типа напряженного состояния. Для северной части острова (п-ва Шмидта) установлены различия геодинамической обстановки между западным и восточным побережьем п-ва. В целом, на изученной территории среди типов напряженного состояния преобладают обстановки горизонтального сдвига (сдвиговый тип деформирования). На восточном побережье много обстановок горизонтального растяжения, которые как правило приурочены к приосевым частям антиклинальных структур. Для западного побережья характерна устойчивая ориентировка оси максимального сжатия в СЗ направлении и её субгоризонтальное положение. Для восточного побережья направление реконструированных направлений максимального сжатия характеризуется большей изменчивостью. По данным проведенной реконструкции характер напряженно-деформированного состояния п-ва Шмидта на неотектоническом этапе имеет существенные отличия от основной территории острова Сахалин. Рассматриваются тектонические напряжения Западно-Сахалинского террейна, полученные с использованием различных тектонофизических методов. Представлена реконструкция поля напряжений угольных месторождений Сахалина, проведенная с помощью графического метода определения ориентировки осей напряжений по трещинам и разрывным нарушениям. Дополнительные полевые тектонофизические исследования позволили оценить преимущественную ориентацию основных систем зеркал скольжения разной кинематики и на их основе реконструировать параметры локальных стресс-тензоров. По типу напряженного состояния для Западно-Сахалинского террейна наиболее характерным определено горизонтальное растяжение.

О РЕЗУЛЬТАТАХ СОПОСТАВЛЕНИЯ КИНЕМАТИКИ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ САХАЛИНА НА ОСНОВЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Каменев П. А

*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия;
e-mail: p.kamenev@imgg.ru*

Представлены оцифрованные разрывные нарушения о. Сахалин, перенесенные с тектонических карт масштаба 1:1 000 000 и установленные по результатам геологических съемок (детализация по картам масштаба 1:200 000 и 1:50 000). Проведено сопоставление структурно-геологических данных о кинематике разрывных нарушений с сейсмологическими данными о механизмах очагов землетрясений. Получено удовлетворительное соответствие этих данных. В южной и северной частях о. Сахалин преобладающим кинематическим типом разломов является взброс/надвиг. В центральной части Сахалина наблюдается смешанный тип кинематики разрывных нарушений – преимущественно взбросового типа, реже сброс и сдвиг. Выявлены две зоны, для которых практически отсутствуют данные как структурной геологии, так и сейсмологии. На их границах преобладают механизмы очагов землетрясений со сдвиговой компонентой.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ СВОЙСТВА СОВРЕМЕННОЙ ГЛОБАЛЬНОЙ ГЕОДИНАМИКИ

Касьянова Н. А.

*Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе,
г. Москва, Россия; e-mail: nkasyanova@mail.ru*

Представлены новые данные о пространственно-временных свойствах современной глобальной геодинамики. Предложена схема системы современных планетарных геодинамически нестабильных разломных поясов, выделенных по результатам комплексного анализа пространственно-временного распределения значимых природных событий (извержения вулканов, разрушительные землетрясения) и техногенных катастроф (промышленная аварийность, особенно прямо или косвенно связанная с аномальными проявлениями деформационных процессов), происшедшие в географически разных регионах за последние 30 лет.

Планетарные геодинамически нестабильные пояса трассированы по линейному группированию синхронно (или поступательно по площади и последовательно во времени) происходящих разноплановых природно-техногенных катастроф, с уже отмеченным периодическим повторением данного геодинамического сценария. С использованием данного критерия установлена система разломных нестабильных поясов, состоящая из девяти разломных поясов северо-западного простирания и пяти поясов — северо-восточного. Ширина разломных поясов варьирует от десятков до тысячи и более километров.

Выделена сеть геодинамических аномалий планетарного масштаба (области пересечения разломных поясов), к ним относятся: область сочленения Северной и Южной Америки; сочленения Чили, Перу и Боливии; территории северо-западной части США, Индонезии и Филиппинских островов, Красноморского региона, восточной части Восточного Кавказа, Турции и др. Отмечено, что в пределах этих аномалий различного рода негативные катаклизмы происходят с «удвоенной» частотой, что связано с поочередной тектонической активизацией ортогонально ориентированных разломных поясов и развитием разных типов тектонических напряжений в их пределах (условия сжатия-растяжения, сдвига). Приведена характеристика временного режима латеральной миграции современных тектонических напряжений в земной коре вдоль и поперек разломных зон разного уровня, с демонстрацией примеров.

Показано, что сочетание приведенной информации с имеющимися знаниями о пространственно-временных закономерностях развития современных геодинамических процессов на региональном и локальном уровнях может составить основу для прогностических научно-практических исследований, раскрывая возможность прогнозирования по площади, во времени и на ближайшую перспективу.

МАГМАТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ВУЛКАНОВ КЛЮЧЕВСКОЙ И БЕЗЫМЯННЫЙ, ПРЕДШЕСТВУЮЩАЯ ИХ ИЗВЕРЖЕНИЯМ

Кирюхин А. В.¹, Бергаль-Кувикас О. В.², Лемзиков М. В.³

^{1,2,3} – *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия;
e-mail: AVKiryukhin2@mail.ru*

Выявлена магматическая активность под Ключевским и Безымянным вулканами в период с 2000 по 2020 гг. по сейсмогенным инъекциям магмы в виде даек и силлов. 3D анализ последовательностей даек и силлов, предшествующих 17 извержениям вулкана Безымянный, показывает, что большинство извержений (10 из 17) инициированы дайками, инжектированными из глубинной магматической камеры Ключевского вулкана (K2, расположенной на интервале глубин от –31 до –27 км) в малоглубинную магматическую камеру Безымянного вулкана (B1, в интервале глубин от –3 до +2 км). В некоторых случаях извержения вулкана Безымянный предшествовали дайки (4 из 17) или силлы (3 из 17), инжектированные из малоглубинной магматической камеры Ключевского вулкана (K1, расположенной на глубине от –1 до +2 км).

Двумерные численные модели распределения напряжений в условиях наклонного залегания слоев указывают на возможность питания вулкана Безымянный за счет крутопадающих даек из глубинного магматического резервуара Ключевского вулкана K2, а также механизма дебондинга Кука-Гордона, открывающего слабый контакт на небольшой глубине для формирования силлов между малоглубинными магматическими резервуарами Ключевского K1 и Безымянного B1 вулканов.

Геохимические характеристики продуктов извержений вулканов Безымянный и Ключевской свидетельствуют об общем источнике магм. Химическая история продуктов извержений Ключевского и Безымянного вулканов показывает родительские свойства Ключевской магмы для продуктов Безымянного с некоторыми отклонениями в макрокомпонентах, которые могут быть объяснены с точки зрения химико-механических взаимодействий в магмоводах.

ТЕКТОНО-ГРАВИТАЦИОННЫЕ ДЕТАЧМЕНТЫ СЕВЕРНОГО СКЛОНА БОЛЬШОГО КАВКАЗА (АДЫГЕЙСКИЙ СЕКТОР)

Колодяжный С.Ю.¹, Кузнецов Н.Б.², Махиня Е.И.³, Шалаева Е.А.⁴, Данцова К.И.⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} – Геологический Институт РАН, г. Москва, Россия; e-mail: kolod63@mail.ru

Рассмотрены особенности тектоники Адыгейского сектора, охватывающего переходную область между Центральным и Западным сегментами Большекавказского орогена в пределах его северного «моноклинального» склона. На рассматриваемой территории нами проведено геолого-структурное и тектонофизическое изучение толщ нижней части разреза альпийского чехла (средняя – верхняя юра), а также выполнен анализ и дешифрирование сейсмических разрезов, характеризующих строение мезозойско-кайнозойских толщ, развитых в прогибах Западного Предкавказья.

Полученные материалы показывают, что при формировании Адыгейского сектора новейшего орогена БК важное значение имели процессы, связанные с развитием субслонных детачментов, обусловленных тектоно-гравитационным соскальзыванием толщ альпийского чехла со склонов и периклиналей растущего орогена БК. Тектонофизические исследования показали, что развитие детачментов происходило в условиях взброс-сбросового режима деформаций при наклонном положении осей сжатия и растяжения, расположенных приблизительно в одной плоскости с векторами перемещений. Оси сжатия ориентированы под большими углами (60° - 70°), а оси растяжения образуют малые углы (20° - 30°) с горизонтальной плоскостью. Такие кинематические и динамические параметры свидетельствуют об условиях вертикально-косого сжатия и субгоризонтального растяжения. В целом тектоно-гравитационные детачменты северного склона БК сформированы при взаимодействии двух факторов: вертикального поднятия орогена БК, обусловленного эндогенными (тектоническими) причинами, и гравитационного соскальзывания геомасс со склонов этого горного сооружения. В совокупности эти факторы обусловили постколлизийные процессы растяжения и коллапс орогенного поднятия.

СЕЙСМОГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ЗАДАЧАХ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Копылова Г. Н.

ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Камчатский филиал, г. Петропавловск-Камчатский,
Россия; e-mail: gala@emsd.ru

Прецизионные наблюдения за вариациями давления подземной воды в глубоких скважинах являются источником информации о современной геодинамической активности верхней части земной коры, вызванных сейсмотектоническими и магматическими процессами. Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН проводит многолетние наблюдения в пьезометрических скважинах Восточной Камчатки за вариациями давления подземных вод с целью изучения сейсмогидрогеодинамических эффектов (СГГЭ) в связи с сильными землетрясениями. Главными генетическими типами СГГЭ являются гидрогеодинамические предвестники, проявляющиеся на стадии подготовки землетрясений (ГП), косейсмические эффекты изменения статического напряженного состояния водовмещающих пород при образовании разрывов в очагах местных землетрясений (КСЭ_1) и при воздействии сейсмических волн (КСЭ_2), а также постсейсмические эффекты (ПСЭ) вследствие изменения состояния системы «скважина - водовмещающая порода» при сейсмическом воздействии. Последовательность проявления генетических типов СГГЭ: ГП–КСЭ–ПСЭ, отражает стадийность сейсмического воздействия на состояние системы скважина – водовмещающая порода и наиболее отчетливо проявляется в изменениях давления подземной воды при сильных местных землетрясениях с величинами магнитуд M_w порядка 7, сопровождающихся сотрясениями интенсивностью не менее 4-6 баллов по шкале MSK-64 в районах скважин. Особенности проявления СГГЭ в отдельных скважинах определяются комплексом локальных гидрогеологических условий: строением вскрытой толщи водовмещающих пород, их фильтрационными и упругими свойствами, наличием либо отсутствием газа в составе порово-трещинного флюида и др.

В докладе, с использованием ранее созданных методов диагностики СГГЭ, их типизации и моделей проводится верификация изученности сейсмогидрогеодинамических эффектов в изменениях давления подземной воды в скважинах Е-1 и ЮЗ-5, для которых получены временные ряды наблюдений длиной 36 и 26 лет. Верификация результатов исследования СГГЭ проводится по данным их регистрации в период землетрясения 3 апреля 2023 г., $M_w=6.5$, произошедшего на эпицентральной расстоянии $d_e=67-77$ км, и анализа прогнозов землетрясений, сделанных в режиме реального времени за 22-летний период сотрудничества с Камчатским филиалом Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений. По авторским оценкам, подтвержденным КФ РЭС, за время с 2002 по 2023 гг., на основе выявленных в режиме реального времени ГП, были осуществлены прогнозы шести землетрясений с $M=5.3-7.2$, в т. ч. четырех наиболее сильных землетрясений с магнитудами $M_w=6.4-7.2$, произошедших на расстояниях 80–350 км от наблюдательной скважины. Предложен эффективный способ представления данных о распределении совокупности СГГЭ, зарегистрированных в отдельных наблюдательных скважинах, в зависимости от соотношения величин магнитуды M_w и эпицентрального расстояния землетрясений до скважин d_e , плотности сейсмической энергии e и величины максимального линейного размера очага землетрясения L .

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00682-24) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

ПЕРСПЕКТИВЫ ИЗУЧЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ СДВИГОВЫХ ЗОН В АНАЛОГОВЫХ МОДЕЛЯХ ИЗ ВЛАЖНОЙ ГЛИНЫ

Корбутяк А. Н.¹, Фролова Н. С.², Чикатуева В. Ю.³, Арешин Н. А.⁴

^{1,2,4} – МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия; e-mail: korbutyakan@mail.ru

³ – ООО «Институт геотехнологий», г. Москва, Россия

Аналоговое моделирование является незаменимым инструментом для понимания развития деформационных структур в разных механических обстановках; особенно хорошо исследованы в моделях зоны сдвига. Начиная с 30-х и до 80-х годов прошлого века моделирование этих зон проводилось преимущественно с использованием влажной глины в качестве эквивалентного материала. При этом структурный парагенез изучался исключительно с поверхности. Затем за рубежом перешли на модели из сухого песка. Преимуществом такого материала является то, что после пропитки жидкостями модели можно резать и анализировать структуру на глубине; более того, в конце прошлого века для этого стали успешно применять X-лучевую компьютерную томографию (КТ). С другой стороны, модели из глины больше соответствуют некоторым природным зонам сдвига, в том числе содержащим рудные полезные ископаемые. К сожалению, модели из влажной глины обычно невозможно разрезать так, чтобы сохранить их структуру. Мы научились это делать, однако метод является несовершенным и не всегда применим.

За рубежом предпринимались попытки исследовать модели из глины с помощью КТ, однако они не привели к успеху, поскольку глина сильно поглощает рентгеновские лучи. Тем не менее, мы все же решили попробовать использовать КТ, полагая, что в глину необходимо ввести некие реперные поверхности из контрастного вещества. Предварительные исследования небольших образцов из разных материалов проводились на томографе Skyscan 1172 компании Bruker, США и томографе ИППИ РАН компании ЗАО «ЭЛТЕХ-Мед». Также была разработана методика изготовления слоистых образцов из глины и изготовлен прибор для моделирования зоны сдвига Риделя, предусматривающий возможность транспортировки образца.

Большая модель (100 x 30 x 5.5 см) была создана из слоев глины разного состава с тонкими прослоями порошка угля и стеклянных шариков. До, 2 раза во время (с остановкой сдвигания) и после деформации производилась съемка с помощью медицинского томографа Siemens Somatom Perspecive. Просмотр результатов с помощью программы 3D Slicer и обработка их в программе Micromine показало особенности структуры на разной глубине модели. Однако, несмотря на обнадеживающие результаты, был выявлен и ряд сложностей, которые предстоит преодолеть.

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ В ПОСТРОЙКАХ ГЕНУЭЗСКОЙ КРЕПОСТИ ФЕОДОСИИ, КРЫМ

Корженков А. М.¹, Ларьков А. С.², Моисеев Д. А.³, Овсяченко А. Н.⁴

^{1,2,4} – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия;*
e-mail: amkor61@yandex.ru

³ – *ООО «Таврическое археологическое общество», г. Симферополь, Россия*

В XIII-XV веках Черное море было охвачено кольцом генуэзских колоний. В Крыму им принадлежала береговая полоса длиной около 400 километров. А крупнейшее поселение генуэзцев располагалось на территории нынешней Феодосии. В то время город назывался Кафа (Каффа), позже, во времена правления Турции - Кефе. Нами были исследованы сохранившиеся стены крепости близ цитадели в поисках следов их разрушений и повреждений и для определения генезиса этих деформаций, а также параметризации сильного исторического события. Были выявлены наклоны и обрушения стен, горизонтальные выдвигания и повороты строительных элементов вокруг вертикальной оси, деформации арочных и купольных конструкций, значительные субвертикальные межблоковые трещины, сквозные трещины, пробивающие несколько каменных блоков насквозь, стены-контрфорсы, следы последующих ремонтов и перестроек. В Феодосийской крепости нами были отмечены 3 явных случая наклона стен: 1) восточной стены башни Клемента на ВЮВ (азимут простираения стены 34^0 , азимут наклонения (declination azimuth) – 124^0); 2) южной стены крепости на ССЗ (азимут простираения стены 63^0 , азимут наклонения – 333^0) и 3) короткого среднего отрезка зигзагообразной части крепостной стены на ЮВ (азимут простираения стены 48^0 , азимут наклонения 138^0). В стенах СВ простираения нами были зафиксированы систематические повороты частей стен по часовой стрелке (3 случая), в перпендикулярных стенах – против часовой стрелки (4 случая). Тем не менее, еще предстоит определить направление распространения сейсмических колебаний – направление на эпицентральною зону по всему комплексу полученных данных, а также возраст сейсмического события. Полученные материалы могут послужить целям уточнения сейсмической опасности восточного Крыма.

КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗОНЫ СОПРЯЖЕНИЯ РЫХЛЫХ ОТЛОЖЕНИЙ И СКАЛЬНЫХ ПОРОД В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ КАРЕЛЬСКОГО ПЕРЕШЕЙКА

Королева А. О.¹, Бондарь И. В.², Шварев С. В.³

^{1,2,3} – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: kao@ifz.ru*

³ – *Институт географии РАН, г. Москва, Россия*

В данной работе выполнены исследования на севере Ленинградской области в районе пос. Боровинка, где крупная разрывная зона, входящая в систему Вуоксинских нарушений, сопряжена с озовой грядой. Были проведены геоморфологические, геофизические и тектонофизические работы. Выполнены георадарные исследования с целью увязки ранее обнаруженных в теле гряды разрывных и складчатых деформаций. В результате обработки геофизических данных удалось установить сильную дислоцированность рыхлых отложений и наличие нескольких зон нарушений сплошности, которые можно интерпретировать как тектонические разрывы. Ряд крупных разрывных зон обнаружено и в скальных обнажениях. В разрезах рыхлых четвертичных отложений зафиксировано несколько выразительных сейсмодислокаций. Совместный анализ полученных геоморфологических, геофизических и тектонофизических данных свидетельствует о тесной взаимосвязи деформаций в современном рельефе, поверхности фундамента, рыхлых отложениях и коренных породах и дает основание для их сопоставления, систематизации и создания пространственно-временных моделей для постледниковой активизации разрывных структур.

СТРОЕНИЕ ОБЛАСТЕЙ ВТОРЖЕНИЯ МАНТИЙНОГО ФЛЮИДА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА СЕЙСМИЧЕСКИХ МОГТ, ГСЗ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МТЗ ДАННЫХ

Кузин А. М.

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва, Россия; e-mail: amkouzin@ya.ru

Миграция флюида в земную кору происходит в виде «горячей» и «холодной» ветвей дегазации. Она достаточно давно и успешно исследуется геохимическими и петрологическими методами. Ранее особенности отображения зон вторжения мантийных флюидных потоков по данным МОГТ-ГСЗ не рассматривались. На основе этих данных и данных МТЗ составлена модель внедрения мантийного флюида в земную кору.

Флюид содержится в веществе мантии под огромным давлением, на поверхности Мохоровичича оно достигает 11.8 кбар. При таком давлении флюид может входить в кристаллическую решетку минерального вещества. Деплетированное мантийное вещество (коромантийная смесь) при растяжении поверхности Мохоровичича насыщается или уже будучи насыщено флюидом в мантии на фронте внедрения создает и постоянно подпитывает перенасыщенную флюидом область. Пересыщение флюидом ведет к нагреву фронтальной области. Флюид начинает просачиваться в различные дефекты структуры поверхности (слоя) Мохоровичича и подошвы коры, происходит потеря прочности, в зоне размягчения геоматериала начинает внедряться коромантийная смесь. На боковых граничных поверхностях резкое различие в вязкости создает условия для возникновения флюидных каналов. Флюид размягчает и разуплотняет вещество коры, в условиях роста горизонтальных напряжений.

В результате может происходить пережим внедряющейся в кору интрузии. Рост горизонтальных напряжений способствует заложению в подошве интрузивного тела наклонных и листрических разрывных нарушений. В зависимости от температуры, давления, мощности очага магматизма, ширины зоны вторжения на границе Мохоровичича и других факторов, а также от соотношения твердой и флюидной фаз, на сейсмических разрезах отраженных волн и сейсмических скоростей возникают схожие, но различные в деталях сейсмические образы консолидированной коры. Для областей вторжения флюида отмечается образование знакопеременных по вертикали тектонических структур.

Вторжение мантийного флюида и магматизм взаимообусловленные процессы. Электронные аномалии электропроводности в основном, это след древнейшего вторжения мантийного флюида и источник вторичного обогащения осадочного чехла углеродом и его соединениями.

ВОЛНОВОДЫ КОНСОЛИДИРОВАННОЙ КОРЫ И ДЕГАЗАЦИЯ ЗЕМЛИ

Кузин А. М.

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва, Россия; e-mail: amkouzin@ya.ru

Впервые выполнен совместный анализ сейсмических и электрических волноводов консолидированной коры пересекающих угольные бассейны (районов, площадей) на территории России. До настоящего времени для угля оставались не выясненными два основных вопроса. 1. Невозможность реконструкции уплотнения торфа до плотности угля с вмещающими его породами. Плотность вмещающих пород меньше, чем угля («загадочный парадокс» по академику Д. В. Наливкину). 2. Пик образования угля приходится на пермский период с аридным климатом, а не каменноугольный период, колоссальным развитием растительного покрова на планете. К тому же в пермский период произошло накопление каменной соли. Для углерода статистически достоверно установлены биогенные и эндогенные изотопно-различные формы нахождения в углях высоких степеней метаморфизма [Войтов, 1988].

Помимо карты волноводов с угольными бассейнами сопоставлялась схема добротности консолидированной коры. Сейсмические и электрические волноводы коррелированы между собой, но контуры сейсмических и электрических волноводов могут не совпадать. В плане положение сейсмических и электрических волноводов совпадает с угольными бассейнами. Под всеми угольными бассейнами фиксируются волноводы. Наиболее четко эта взаимосвязь видна для угольных бассейнов с высоким содержанием метана. На схеме добротности угольные бассейны коррелируются с границами значений добротности. Четкая корреляция угольных бассейнов с волноводами определяет возникновение волноводов процессом дегазации Земли. Разрушение в геосреде приводит к заполнению области разрушения флюидом.

Этот вывод подтверждается соотношением положением волноводов и контактом разно скоростных блоков на границе Мохоровичича. Выделены следующие типы соотношения волноводов консолидированной коры с вертикальными контактами на границе Мохоровичича: 1. Волновод генетически связан с контакт блоков на Мохо; 2 – Волновод терпит разрыв над контактом на Мохо; 3 – Структура, морфология волновода не меняется над контактом над Мохо.

Анализ картины распределения волноводов в разрезе позволяет сделать выводы: 1 – поступление флюида может происходить снизу и с боку; 2 – волновод в фундаменте подобен резервуару в осадочном разрезе; 3 – вероятно, имеет место локальное просачивание флюида сквозь границу Мохо.

ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОДНЯТИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Кузьмин Д. К.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: dimak1292@mail.ru

Наиболее известной формой негативных геодинамических последствий длительной разработки месторождений являются обширные просадки территории всего месторождения. Зачастую наблюдаются и обратные просадкам процессы – поднятия земной поверхности, в следствии закачки воды или пара в продуктивный пласт. Подобные обширные деформации земной поверхности могут приводить к формированию существенных градиентов смещений в процессе длительной разработки месторождений. Относительные деформации и наклоны могут достигнуть пороговых значений – 10^{-3} , которые обозначены как опасные в целом ряде нормативных документов.

В работе продемонстрирована методика, позволяющая оценить уровень деформаций земной поверхности при разработке месторождений нефти и газа, на примере геодинамических полигонов Татарстана и Казахстана. Достаточно высокая детальность и точность геодезических наблюдений на двух полигонах позволили проанализировать вертикальные смещения как на длительных временных промежутках, так и на коротких отрезках. В свою очередь, детализация геологических данных и графики изменения пластового давления по месяцам, позволили смоделировать эти поднятия. Аналитическая модель деформируемого пласта была применена для построения объемных распределений вертикальных смещений земной поверхности за определенный период разработки месторождений. Сопоставление аналитически смоделированных поднятий земной поверхности с геодезическими графиками позволяет уточнить оценку потенциально опасных деформаций земной поверхности на исследуемых объектах.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ К ЗАДАЧЕ ВЫДЕЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ ТРЕЩИН НА ОСНОВЕ ДАННЫХ РАСШИРЕННОГО КОМПЛЕКСА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКВАЖИН

Куприн Д. Ю.¹, Архипов Н. Д.², Дубиня Н. В.³

^{1,2,3} – *Институт физики Земли имени О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия;*
e-mail: kuprin.daniil.geo@gmail.com

^{2,3} – *Московский физико-технический институт, г. Москва, Россия*

Доклад описывает методику применения алгоритмов машинного обучения для обработки результатов расширенного комплекса геофизических исследований скважин, а именно, результата исследования околоскважинного пространства скважинным микроимиджером на предмет выделения, определения геометрических характеристик и классификации таких структурных элементов околоскважинного пространства как естественные трещины.

Выделение трещин и определение их геометрических характеристик происходит посредством обработки изображения стенок скважины, как стандартными методами компьютерного зрения, так и с помощью нейронной сети. Полный граф обработки данных состоит из процедур предобработки данных, выделения трещин и их классификации, и постобработки. Процедуры предобработки направлены на улучшение качества входных изображений, и включают в себя удаление артефактов на изображении и минимизацию шума. Стандартные методы компьютерного зрения включают себя подходы, основанные на бинаризации изображения и обработке градиентов яркости изображения, и используются для выделения регионов, вероятно содержащих трещины. Далее, при помощи сверточной нейронной сети происходит выделение и классификация трещин. После этого изображение бинаризуется и для каждого выделенного контура подбираются оптимальные геометрические параметры трещин.

«АРЕАЛЬНЫЙ РИФТОГЕНЕЗ»: СТРУКТУРА, ЭВОЛЮЦИЯ, ГЕОДИНАМИКА

Леонов М. Г.

Геологического института РАН, г. Москва, Россия; e-mail: mgleonov@yandex.ru

Рифтогенные структуры – одно из самых распространенных проявлений внутриконтинентального тектогенеза. Наиболее изучены рифты, генетически связанные с региональными расколами земной коры и имеющие линейный габитус: преобладание протяженности (до многих тысяч километров) над шириной (десятки, реже сотни километров). Известны также ареальные (до 500×1000 км) рифтогенные системы, или системы рассредоточенного (диффузного, от лат. *diffusio* – распространение, рассеивание) рифтинга, состоящие из многократного чередования линейно ориентированных впадин (грабен, грабен-синклиналей) и соразмерных им выступов фундамента (горстов, горст-антиклиналей). Системы ареального рифтинга, обычно рассматривают в общем контексте рифтовой тектоники, а исследования, посвященные их геологии и сравнительному анализу, практически отсутствуют. Данное сообщение восполняет этот пробел. В докладе рассмотрены объекты, расположенные в различных частях Земного шара и в разных геодинамических обстановках: Провинция бассейнов и хребтов (Сев. Америка), Селенгино-Витимская зона (Западное Забайкалье), Зондский шельф Южно-Китайского моря, Гиссаро-Алайский и Центральный сегменты Тянь-Шаня, Рифтовая система Белого моря. На основании сравнительного анализа указанных объектов показано: (1) развитие ареальных рифтогенных систем происходит в пределах утоненной (окраины платформ) или реологически ослабленной (орогены) земной коры; (2) для диффузного рифтинга характерно отсутствие магистральных рифтовых долин и сквозькоровых разломов; (3) условием возникновения ареального рифтогенеза является наличие сдвигового поля напряжений и фрактальная организация геологического пространства; (4) формирование ареальной взаимосвязанной системы «впадины-поднятия» определяется объемным твердо-пластическим (реидным) течением горных масс фундамента; (5) тектонические ансамбли подобного типа ни структурно, ни динамически не являются аналогами линейных рифтовых систем: линейные системы – производные раскола и раздвижения сегментов континентальной коры (составляющая субглобального тектогенеза), ареальные системы – результат хрупко-пластичного (реидного) течения горных масс в пределах динамически неустойчивых участков платформ и орогенов (составляющая регионального тектогенеза).

Исследование выполнено по Теме НИР Геологического института РАН.

О ПРОБЛЕМЕ ВЕРИФИКАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Лермонтова А. С.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: alermontova@mail.ru

В последнее время существует тенденция придавать всё меньшее значение физическому моделированию геологических процессов. Основным методом проверки теоретических гипотез становится моделирование численное. Это неудивительно: численный эксперимент позволяет смоделировать ситуации, которые в принципе не поддаются физическому моделированию в лабораторных условиях, а также заглянуть внутрь процессов, отслеживая величины всех параметров во всех точках модели в любой момент времени. Кроме того, он значительно проще с точки зрения организации, не требует ни отдельного помещения, ни какого-либо дополнительного оборудования кроме компьютера. С другой стороны, при физическом моделировании часто нет возможности соблюсти все необходимые условия подобия. Однако следует иметь в виду, что численный эксперимент также несвободен от недостатков, вызванных ошибками при написании кода. Причём если ошибки, допущенные в условиях решаемой задачи могут быть отслежены и исправлены при помощи здравого смысла, то опечатки намного опаснее, поскольку они, как правило, хорошо замаскированы в коде, и при отсутствии проверки результата вычислений независимыми методами существует риск принять на веру ошибочное решение.

СОВРЕМЕННЫЙ ЭТАП АКТИВИЗАЦИИ РОЕВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В РЕГИОНЕ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ И ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ, И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РОЕВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Литовченко И. Н.¹, Лютикова В. С.²

^{1,2} – *Национальный научный центр сейсмологических наблюдений и исследований МЧС РК, г. Алма-Ата, Республика Казахстан; e-mail: litovira@rambler.ru*

Анализируется слабая сейсмичность на примере роев землетрясений, картируются слабые землетрясения (рои) в регионе Северного Тянь-Шаня и прилегающих территорий, а также рассчитываются термодинамические параметры в очагах роев землетрясений. Численные значения полученных параметров дают возможность более подробно исследовать термодинамические условия в очагах слабых землетрясений (роев) и более ясно понять природу их возникновения.

РАЗВИТИЕ МЕТОДИКИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЗОН РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ МЕТОДАМИ ДЗЗ АКТИВНЫМИ И ПАССИВНЫМИ СЪЕМОЧНЫМИ СИСТЕМАМИ ВЫСОКОГО И СВЕРХВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Малышкин Т. Е.¹, Гордеев Н. А.²

^{1,2} – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия;
e-mail: timurmalyskin@gmail.com*

Решение задачи по оперативному и качественному картографированию зон напряженных состояний является одной из наиболее актуальных проблем современной тектонофизики. Данная работа является развитием технологии, описанной в более ранних публикациях.

В ходе разработки технологии обнаружения объектов интереса были использованы архивные космические снимки сверхвысокого пространственного разрешения с пассивных ("Канопус-В", "Ресурс-П") и активных ("Sentinel-1b") съемочных систем. Определение зон разрывных нарушений выполняется в соответствии со следующими параметрами, определенных по данным ДЗЗ: критерий асимметрии поперечного профиля долины, плотность и вектор микроводотоков, градиент вертикальных скоростей движения земной поверхности, смена образующей породы поверхности и другие. Обработка данных ДЗЗ выполнялась с применением библиотеки языка программирования Python с открытым исходным кодом.

Работа выполнена в рамках государственного задания РАН.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ В ОБЛАСТЯХ ОРОГЕНОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ И ЮЖНОЙ СИБИРИ ПО ДАННЫМ ГНСС НАБЛЮДЕНИЙ

Мансуров А. Н.

Институт Физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: sur98gdir@gmail.com

В работе представлены результаты расчета распределения скорости современных деформаций земной коры на территории внутриконтинентальных орогенов Азиатского континента, зон их сочленения и прилегающих к ним областей. Исследовались следующие регионы:

- Памир и Таджикская депрессия;
- Западный, Центральный и Восточный Тянь-Шань;
- Северное и восточное окаймление Таримской плиты;
- Джунгарский Алатау, Саур-Тарбагатай и Казахстанский мелкосопочник;
- Российский, Казахстанский, Монгольской и Гобийский Алтай;
- Саяны и Восточная часть Байкальской Рифтовой Зоны.

Впервые получены данные о направлении и величине скорости деформации земной коры в зонах на границах разных ГНСС сетей:

В зоне сочленения горных систем Алтая и Саян – территория между Алтайской ГНСС сетью ИНГГ СО РАН и Байкало-Монгольской ГНСС сетью ИЗК СО РАН;

На территории Алтая вдоль границы России и Казахстана – между Алтайской ГНСС сетью ИНГГ СО РАН и Центрально-Азиатской ГНСС сетью НС РАН в г. Бишкеке.

Расчет распределения тензора скорости деформации земной коры выполнялся как по сглаживающей методике, так и на основе триангуляции сети пунктов наблюдений, по наборам из трех-четырёх пунктов, выбранных с учетом возможного направления простираения разрывных нарушений. Полученные результаты сравнивались между собой, а также с оценками направлений современных деформаций по сейсмическим данным.

НОВЕЙШИЕ РАЗРЫВЫ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ГОРНОГО АЛТАЯ

Мануилова Е. А.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: e.manuilova@ifz.ru

В докладе будут представлены результаты структурно-геоморфологического анализа рельефа по методу Н. П. Костенко, проведенному на территории юго-восточной части Горного Алтая. Это исследование позволило в масштабе 1: 200 000 выявить новейшие разноранговые поднятия, впадины, слабые зоны и новейшие разрывы, выраженные в современном рельефе. Установлены простирания новейших разрывов и слабых зон, которые местами развиваются по зонам древних разломов. Для некоторых разрывов установлена кинематика по комплексу геолого-геоморфологических признаков. По комбинации новейших разрывов с право- и лево-сдвиговой составляющей северо-западного и северо-восточного простирания, соответственно, выявлена ориентировка оси горизонтального сжатия. Она изменяется от северо-северо-западного до северо-северо-восточного направления.

Исследование выполнено в рамках Госзадания ИФЗ РАН.

РАЗВИТИЕ СТРУКТУРНО-ПАРАГЕНЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА АНАЛИЗА МАЛЫХ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ Л. М. РАСЦВЕТАЕВА

Маринин А. В.¹, Тверитинова Т. Ю.²

^{1,2} – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: marinin@ifz.ru*

² – *МГУ имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

Наблюдаемые в природе тектонические деформационные структуры – зеркала скольжения, трещины, небольшие разрывы и другие малые структурные формы являются природным источником информации о напряженно-деформированном состоянии в массиве горных пород и его эволюционном развитии. В тектонофизике созданы методы определения параметров тектонических напряжений и приращений сейсмотектонических деформаций, одним из которых является метод структурно-парагенетического анализа малых дизъюнктивов Л. М. Расцветаева (1987). Формирование метода, основанного на изучении получаемых при полевых исследованиях структурных рисунков малых разрывных нарушений, проходило в горно-складчатых сооружениях Альпийского пояса СССР (Копет-Даг, Большой Кавказ). В дальнейшем основным регионом применения метода являлся Северо-Западный Кавказ, где авторы совместно с Л. М. Расцветаевым собрали и проанализировали большое количество полевых данных. Разработанные в лаборатории тектонофизики алгоритмы, программы и средства визуализации наблюдаемых тектонических деформационных структур позволили на новом уровне использовать возможности метода с его применением в нескольких регионах России и ближнего зарубежья с разным тектоническим строением.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН И ВОЛН НАПРЯЖЕНИЙ В ГЕТЕРОГЕННОМ ТВЕРДОМ ТЕЛЕ (ЛАБОРАТОРНЫЕ И НАТУРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ)

Махмудов Х. Ф.

*Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия;
e-mail: h.machmoudov@mail.ioffe.ru*

Разработан и реализован алгоритм трехмерной локации в натуральных условиях, учитывающий изменения поля скоростей в процессе разрушения гетерогенных твердых тел. Совершенствована методика фильтрации техногенных помех при акустико-эмиссионном мониторинге. Разработан съемный механизм и датчик акустического импульса с необходимой амплитудно-частотной характеристикой для установки на закладной детали. Разработана методика измерения поля скоростей распространения упругих волн в массиве гетерогенных пород в натуральных условиях. Установлен спектральный состав отклика массива гетерогенных пород и бетонной обделки подземных сооружений на возбуждение его ударом шара, спектр сигнала отклика сконцентрирован в диапазоне 0.7-3.2 kHz. Усовершенствован и внедрен алгоритм диагностики на подземном объекте ФГУП «ГХК» Росатом.

Предложен метод расчета параметров ударной волны на стенке полости взрыва с учетом физических процессов, происходящих при преломлении детонационной волны (что позволяет анализировать воздействие взрыва на твердую гетерогенную горную породу). Установлено, что коэффициент передачи давления во многом зависит от свойств твердой гетерогенной породы. Предложенный расчет коэффициента передачи давления позволит перейти к рациональному использованию энергии взрыва и для прозвучивания бетонной обделки и горного массива. Усовершенствован метод определения рациональных параметров воздействия СВЧ и НЧ- низкочастотной энергии для технологического режима (сушки, дробления, деструкции) твердых гетерогенных тел в поле стоячих СВЧ- и НЧ волн.

Установлен механизм преобразования микроволновой энергии в тепловую и возникновения термоупругих напряжений в модельных лабораторных экспериментах и подробно описаны их отличия от механизма возникновения механических термоупругих напряжений при механическом воздействии.

Установлено, что на основе изучения динамики развития наведенного микро трещиноватости можно обосновать эффективные параметры воздействия СВЧ и НЧ энергии на гетерогенные горные породы для их разрушения, и также рекомендовано использования микроволновой и низкочастотной энергии для прозвучивания бетонной крепи и массива горных пород.

ДОПОРОВОЕ УДАРНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ОДНООСНО-СЖАТОГО ГРАНИТА

Махмудов Х. Ф.¹, Щербаков И. П.², Чмель А. Е.³

^{1, 2, 3} – Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия;
e-mail: h.machmoudov@mail.ioffe.ru

Выход энергии при наведенном извне землетрясении может быть на много порядков величины выше, чем энергия источника его активации. Крупномасштабные процессы, вызываемые низкоэнергетичными событиями, относят к триггерным эффектам, при которых термодинамическая система (в частности, геосистема), находящаяся в метастабильном состоянии на грани энергетического баланса, теряет равновесие при незначительном внешнем воздействии. В настоящем исследовании описано триггерного перехода напряженной горной породы в неравновесное состояние в масштабе лабораторного эксперимента. Модельная триггерная ситуация создавалась сочетанием статической компрессионной нагрузки и точечного ударного воздействия, направленного нормально к оси сжатия. Процесс накопления структурных дефектов (микротрещин) при двойном нагружении наблюдался методом акустической эмиссии (АЭ). Полный цикл испытания включал 9 последовательных ударов (по 3 при нулевой и двух сжимающих нагрузках) плюс завершающие 1-2 удара при сжатии $Q/Q_{th} \cong 0.97$, которые всегда приводили к макроскопическому разрушению образца. При воздействии на ненагруженный прессом образец все 3 первых импульса АЭ имели примерно продолжительную длительность (~ 10 мкс). При сжатии в серии $Q = 0.6 Q / Q_{th}$ время излучения звука возрастало от удара к удару. В финальной серии $Q = 0.9 Q / Q_{th}$ время генерации АЭ при первом ударе достигает максимального в настоящем эксперименте, а затем вновь сокращается и по продолжительности, и по интенсивности импульсов. При повышении компрессии до величины $\sim 0.97 Q/Q_{th}$ происходило макроскопическое разрушение — фрагментация образца. Подчеркнем, что энергия бояка была всегда одинаковой, но масштаб разрушения в последнем случае оказался несопоставимым с повреждениями, возникшими при меньшей компрессии. Эксперимент с допороговым, повторяющимся ударным воздействием на образец гранита при ступенчатом увеличении одноосного сжатия показал два аспекта изменения микромеханики разрушения породы при ужесточении условий динамического воздействия. В сериях ударов с одинаковой энергией происходит изменение размеров повреждений от преимущественно мелких к более крупным при последующих ударах. Эта тенденция становится более выраженной при увеличении компрессии гранита. Эффект вызван слиянием микротрещин, возникших на первых этапах воздействия. В предельно сжатом образце при ударном воздействии ортогонально оси сжатия (в нашем случае при $0.9 Q/Q_{th}$) первый удар по неповрежденной поверхности приводил к появлению наименее мелких трещин. Внешне объект был стабилен. Но фактическое (неравновесное) состояние при незначительном увеличении сжимающего давления (до $0.95-0.97 Q/Q_{th}$) приводило к фатальному триггерному срыву.

АНАЛИЗ РАЗЛОМНОЙ ТЕКТониКИ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА И ЕЁ РОЛИ В РУДООБРАЗОВАНИИ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИСТАНЦИОННЫХ РЕГИОНАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Минаев В. А.¹, Устинов С. А.², Петров В. А.³, Свечеревский А. Д.⁴, Нафигин И. О.⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} – *Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, г. Москва, Россия; e-mail: minaev2403@mail.ru*

Приводятся результаты комплексного дистанционного анализа разломной тектоники Кольского полуострова, выполненного в региональном масштабе. На основе цифровой модели рельефа, генерализированной для различных масштабных уровней, выделены линеаменты ручным и автоматическим способами, проведена их тематическая обработка в ГИС-среде. На основе полученных результатов и картографических данных проведены тектонофизические реконструкции с использованием модели П. Л. Хэнкока (1985). Результаты авторских реконструкций сопоставлены с литературными данными. Расчет показателя тенденции к сдвигу (транстенсии), с учетом установленной в результате тектонофизических реконструкций ориентировки главных осей регионального поля напряжений-деформаций, позволил выявить наиболее гидравлически активные сегменты разрывных структур на момент внедрения базит-ультрабазитовых массивов и дайковых комплексов пегматитовых поясов. С этими магматическими образованиями на территории Кольского полуострова связаны рудные месторождения дефицитных видов стратегического минерального сырья (медь, никель, хром, редкие металлы и др.). Выделены участки, перспективные на обнаружение новых рудных объектов.

ГЕРМЕНЕВТИКО-НАРРАТИВНЫЙ ПОДХОД КАК СПОСОБ СРАВНЕНИЯ АРГУМЕНТОВ КОНКУРИРУЮЩИХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ГИПОТЕЗ

Миронов В. А.

*Институт философии и права Новосибирского государственного университета, г. Новосибирск,
Россия; e-mail: mironovv@mail2000.ru*

В работе представлена авторская методология философско-методологического анализа и сравнения конкурирующих геологических гипотез. В качестве основания авторского подхода были взяты философские доктрины, ориентированные на исследование оснований результатов интерпретации в гуманитарных науках, а именно такие доктрины как герменевтика и нарратология. Согласно данным философским учениям, каждый исследователь, пытаясь воспроизвести те или иные события, в первую очередь должен определить, какую именно информацию он будет считать важной, а какую нет. Так как всякая гипотеза или модель есть упрощение реальности, а полное тождество с реальностью может иметь только сама реальность, то всякий исследователь должен с необходимостью упрощать образ (модель) своего объекта исследования. На основании этого автором данной работы была разработана система концептуальных уровней, влияющих на интерпретацию исходных геологических данных: метатеория (глобальный нарратив, глобальная теория), гипотеза (гипотеза-нарратив или локальная гипотеза), специализация геолога, профессиональный опыт геолога, цель, а также аппаратура и приборы исследования. Каждый из этих уровней является частью общей стратегии всякого геологического исследования, где, в конечном счете, каждый из этих уровней должен быть согласован со всеми остальными. Такая согласованность концептуальных уровней является важным критерием истинности всякой исследовательской стратегии геолога. Следовательно, если геологи изначально выбирают разные стратегии, разные подходы, то вполне могут в таком случае прийти к совершенно разным интерпретациям генезиса «одних и тех же» геологических тел, структур и т.д. Авторская методология сравнения позволяет взглянуть на геологические исследовательские стратегии в некотором смысле «изнутри», что вероятнее всего будет способствовать взаимопониманию между геологами и обнаружению фундаментальных причин конфликта интерпретаций. В качестве примера автор приводит сравнение двух гипотез о генезисе «ямальских кратеров».

ХЕРСОНЕССКИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ: ЛОКАЛИЗАЦИЯ И ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ

Моисеев Д. А.¹, Корженков А. М.², Овсяченко А. Н.³, Ларьков А. С.⁴

¹ – ООО «Таврическое археологическое общество», г. Симферополь, Россия; e-mail: fortmenshikof@yandex.ru

^{2,3,4} – Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

Херсонес Таврический расположен в Юго-Западном Крыму, на северной границе Гераклейского плато. С точки зрения активной тектоники, город расположен в месте, где моноклинальное плато Гераклейского полуострова нарушено тектонически активным грабеном – Севастопольской бухтой. Нами были продолжены археосейсмологические исследования памятника с целью выявления сейсмически наведенных деформаций в стенах древнего города. В своем исследовании мы изучили как наземные сооружения, так и находящиеся в настоящее время под водой, имеющие сейсмогенные деформации.

«Ромбовидная» башня. Наиболее информативным для изучения последствий землетрясений в Херсонесе является т.н. «Ромбовидная башня» приморской оборонительной линии в Портовом районе города, погрузившаяся в море на 0,73 м, а потом на глубину 1,68 м. Весь комплекс деформаций свидетельствует о перекосе первоначально прямоугольной башни, после чего она получила «ромбовидную» форму. «Изгибание» может быть связано с расположением строительного комплекса в непосредственной близости с зоной сейсмогенерирующего разлома. Изгиб сооружения вызван подвижками грунта по разлому, величина которых увеличивается по мере приближения к главной плоскости разрыва (эффект "волочения" в структурной геологии). Близким по механике формирования можно назвать деформации («изгибание» крестообразной в плане церкви) монастыря Св. Симеона в Сирии. Там механизм формирования такой деформации в комплексе с действием на нее разлома был рассмотрен подробно. Башня была повреждена дважды: после начала XI в. и в 1-й половине XIV в.

«Эллинистические» городские ворота. Аналогичной «ромбовидной башне» деформацией можно назвать «опускание» городских ворот эллинистического времени в Портовом районе. Они были построены в середине IV – на рубеже IV/III в. до н.э. В I–III вв. ворота оказались заблокированы кладкой, проезжая часть перед ними была поднята где-то на половину их проезда. Не ранее IX в., в рамках IX–X вв. уровень проезжей части вновь оказался повышен. Теперь они оказались полностью погребены, а над ними в стене сооружается калитка. На данный момент верхняя часть ворот, возможно, арка – утрачены.

Куртина 19 и калитка в ней у башни XVI. Изменился уровень дневной поверхности и в месте стыка куртины 19 и башни XVI. Калитка в месте стыка этих узлов обороны была построена в середине – конце III в. до н.э. В какой-то момент калитка была погребена и заброшена. Новая средневековая калитка была устроена над ней в IX–X вв. В куртине 19 и калитке эллинистического времени прослежен комплекс сейсмогенных деформаций. Ансамблю трещин характерно цветковое раскрытие, но не вверх, а вниз. Это говорит о сдвиговой составляющей в трещинном комплексе. Причина образования этих трещин – не просадка грунта под сооружением, а напряжения, возникшие в верхней части конструкции, скорее всего, вследствие колебаний и неравномерной концентрации напряжений, приводящим к локальным сдвигам.

Башня императора Зенона (XVII). Было прослежено два последовательных разворота против и по часовой стрелке фундаментной части каменной кладки 3го пояса башни. Сооружение 3-го пояса башни произошло в VIII–IX вв.

Гончарный центр Херсонес. В верховьях Карантинной бухты и до оборонительных стен Цитадели Херсонеса расположен гончарный центр. Его особенностью является локализация гончарных печей, как на суше, так и на дне бухты. Под водой открыты: под гончарной печи (2013 г.), отвалы брака причерноморских амфор 24 класса по ХК-95 (1952 г., 1979 г.), которые можно датировать IX в. или его 1-й половиной, ближе к середине столетия.

После приведенного обзора проявления сильных землетрясений в районе Гавани Херсонеса не вызывает сомнений. Эти землетрясения приводили к значительным изменениям ландшафта, что говорит о том, что их эпицентральная зона либо находилась в Карантинной бухте, либо была приурочена к грабену Севастопольской бухты. Хронологическая стратификация этих событий остается сложным вопросом.

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ В ЗАДАЧЕ ПОИСКА РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ

Молчанов А. Б.¹, Гордеев Н. А.²

^{1,2} – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: alexeybm2009@gmail.com*

Авторами работы на протяжении нескольких лет ведется усовершенствование работы структурно-геоморфологического метода Л. А. Сим. Была разработана и многократно апробирована программа по автоматизации этого метода – SimSGM.

В последние годы фокус исследований в этом направлении сместился от реконструкции осей неотектонических напряжений по известным данным о разрывах к обратной задаче: поиску самих разрывов. Главной сложностью на этом пути является следующее. В методе Л. А. Сим устанавливается связь между направлениями трёх классов объектов: разрыва, оперяющих трещин и осей напряжений. Чтобы найти один из них, нужно знать два других, а при поиске направления разрыва априорные данные об ориентациях напряжений по-прежнему отсутствуют. В этой ситуации поиск в самом простом случае сводится к перебору всех возможных вариантов. Для каждой точки исследуемого участка необходимо проверить каждое направление: вычислить для него ориентации осей напряжений и убедиться, что они не меняются вдоль этого направления на некотором расстоянии. Этот параметр можно выбрать на основе среднего расстояния между соседними линейными элементами рельефа, которые интерпретируются как оперяющие трещины. Поскольку каждая точка участка и каждое направление в ней рассматриваются независимо, то такие вычисления можно эффективно распараллелить. Наиболее длинные серии точек с совпадающими и продолжающими друг друга направлениями, прошедшими проверку, предлагается считать разрывными нарушениями.

ИЗУЧЕНИЕ ГЕНЕЗИСА НАДЛИТОСТАТИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ КОРЫ АЛТАЯ МЕТОДОМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Мягков Д. С.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: dsm@ifz.ru

Высокий уровень надлитостатических напряжений в коре внутриконтинентальных орогенов, получен по данным тектонофизических реконструкций, но вопрос о его генезисе на текущий момент остаётся открытым. В данной работе представлен механизм, напрямую не связанный с латеральным взаимодействием блоков в рамках тектонического процесса, о генерации надлитостатических напряжений в процессе формирования магматических поясов. В его рамках нагружение среды осуществляется проникающим по трансформным разломам магматическим расплавом, давление в котором связано с давлением в очаге по линейной зависимости, что в некоторых случаях даёт значительно больший уровень давления в средней и верхней коре по сравнению с литостатикой пород. Именно, при плотности магмы равной или несколько меньшей плотности пород коры можно получить превышение давления магмы на первые сотни МПа даже при сравнительно небольшом (2-5%) превышении давления над литостатикой в самом очаге. В текущей работе представлены результаты численного моделирования о формировании подобных «магматогенных» напряжений в коре Центрально-Азиатского складчатого пояса. Численная модель представляет собой дальнейшее развитие вышеописанной аналитической модели, для расчёта используется применялась явная конечно-разностная схема, разработанная Уилкинсом для исследования упруго-пластических тел и усовершенствованная Стефановым для применения в геомеханике. Тела модели рассматриваются как упругопластические, берётся подходящая для геосреды модифицированная модель Друккера-Прагера-Николаевского. В её рамках среда рассматривается как упрочняющееся упругопластическое тело, используется неассоциированный закон пластического течения. Результаты моделирования соответствуют стадиям нагружения коры современного Алтая и сопредельных структур в результате воздействия магматических процессов Алтайской, Южно-Монгольской и Селенгинской дуг. Дается сравнение с тектонофизическими данными, показано, что данный механизм не только объясняет общий уровень напряжений, но и соответствует различным типам напряжённого состояния в орогенах и окружающих их структурах.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЕЗОВ КОРЫ ВОСТОЧНОЙ ФЕННОСКАНДИИ

Мягков Д. С.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: dsm@ifz.ru

В работе представлены результаты геодинамического моделирования по профилю Ковдор-Апатиты для сравнительного анализа и интерпретации 2D геоэлектрического разреза. Моделируется воздействие различных геодинамических факторов, таких как влияние мелкомасштабной астеносферной конвекции, коровой плотностной неоднородности, давление со стороны соседних блоков Земной коры, влияние экзогенных факторов (эрозии и осадконакопления). Результаты моделирования сравниваются с тектонофизическими данными о структуре напряжённого состояния коры региона. На основе полученных данных было произведено сопоставление с аномалиями проводимости геоэлектрических разрезов, что позволило сопоставить часть наблюдаемых аномалий с зонами влияния активных разломов региона.

ВОЗМОЖНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА АФТЕРШОКОВЫЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Новиков В. А.

Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия; Институт динамики геосфер РАН, г. Москва, Россия; e-mail: novikov@ihed.ras.ru

В последнее время в научных сообщениях обсуждается возможность инициирования землетрясений как искусственными, так и природными электромагнитными импульсами, обусловленными сильными солнечными вспышками или геомагнитными бурями [1, 2]. В работе [3] было показано, что импульсы геомагнитного поля с амплитудой до 100 нТл и длительностью до 100 с генерируют в земной коре всплески теллурических токов с плотностью до 10^{-6} А/м², которые, в свою очередь, могут инициировать землетрясение [1]. При этом для проявления триггерного эффекта аномально высокие теллурические токи должны генерироваться в такой зоне земной коре, которая находится в субкритическом напряженно-деформированном состоянии. Такие зоны постоянно возникают в афтершоковой области сильного землетрясения как следствие последовательной перестройки напряженно-деформированного состояния земной коры после основного толчка.

Для дополнительного подтверждения возможности инициирования землетрясений импульсами теллурических токов, генерируемых пульсациями геомагнитного поля в проводящих разломах земной коры, проведен анализ афтершоковых последовательностей 382 сильных землетрясений ($M \geq 7$), произошедших на земном шаре в период с 01.01.1999 по 01.05.2024, и пульсаций горизонтальной компоненты геомагнитного поля и ее производной dB_x/dt в афтершоковых зонах, дающих максимальный вклад в генерацию всплеска теллурических токов в земной коре.

Показано, что в том случае, когда локальные пульсации dB_x/dt в афтершоковой зоне находятся на уровне 60-80 нТл/мин, наблюдается отклонение от закона Омори в виде кратковременного роста афтершоковой активности в течение 2-3 суток с задержкой 7-8 суток после возникновения пульсаций геомагнитного поля. В ряде случаев магнитуда афтершоков в этот период может достигать $M5-6$. Таким образом, полученные результаты являются дополнительным подтверждением возможности инициирования землетрясений импульсами геомагнитного поля, а также указывают на необходимость временной приостановки спасательных и восстановительных работ после основного толчка для обеспечения их безопасности во время возникновения пульсаций геомагнитного поля, обусловленных сильными солнечными вспышками, геомагнитными бурями с внезапным началом или протонными событиями, которые могут инициировать сильные афтершоки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (проект № 24-27-00205).

1. Zeigarnik V. A.; Bogomolov L. M.; Novikov V. A. Electromagnetic Earthquake Triggering: Field Observations, Laboratory Experiments, and Physical Mechanisms - A Review. *Izv., Phys. Solid Earth*. 2022. 58. 30–58.
2. Sorokin V.; Yaschenko A.; Mushkarev G.; Novikov V. Telluric Currents Generated by Solar Flare Radiation: Physical Model and Numerical Estimations. *Atmosphere*. 2023. 14. 458.
3. Sorokin V.; Novikov V. Possible Interrelations of Space Weather and Seismic Activity: An Implication for Earthquake Forecast. *Geosciences* 2024. 14. 116.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ОРИЕНТАЦИЙ ЕСТЕСТВЕННЫХ ТРЕЩИН НА ТОЧНОСТЬ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ РЕКОНСТРУКЦИИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

Новикова Е. В.¹, Дубиня Н. В.²

¹ – *Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, г. Москва, Россия; Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: helenvn97@gmail.com*

² – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; Московский физико-технический институт, г. Москва, Россия*

В работе рассматривается один из методов оценки напряженного состояния геологической среды по результатам анализа естественной трещиноватости. В основе метода лежит представление о том, что соотношение между нормальными и касательными напряжениями, действующими на плоскости естественной сдвиговой трещины, связано со специальными свойствами среды, которые могут быть изучены с использованием геофизических методов.

В рамках рассматриваемого подхода используется описанное представление и считается, что знание о напряженном состоянии некоторого набора естественных трещин позволит реконструировать осредненное напряженное состояние всего горного массива. В работе проведен анализ влияния распределения пространственных ориентаций естественных трещин в исходном наборе данных на точность решения обратной задачи реконструкции напряженного состояния горного массива. Для этого генерируются синтетические наборы естественных трещин с заданными параметрами, характеризующими пространственные ориентации естественных трещин и «истинные» напряженные состояния среды, в которую синтетически помещен каждый набор. На основе таких входных данных осуществляется решение обратной задачи по реконструкции напряженного состояния массива горных пород, а именно определения следующих характерных параметров: 3 угла Эйлера, отвечающие за поворот главных осей тензора напряжений, коэффициент Лоде-Надаи и соотношение между максимальным и минимальным главными напряжениями, а также коэффициент трения. Результаты реконструкции 6-ти параметров напряженного состояния сравниваются с «истинным» напряженным состоянием среды. Рассматриваются вопросы влияния погрешности в исходных данных, количества интерпретируемых трещин, асимметрии и кучности их распределения по пространственным ориентациям на точность решения обратной задачи и неопределенность в определении указанных параметров напряженного состояния.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ФИЗИЧЕСКИ-ИНФОРМИРОВАННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ВОЛНОВОГО УРАВНЕНИЯ И ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

Нугманов И. И.

АНО ВО «Университет Иннополис», г. Иннополис, Россия; e-mail: i.nugmanov@innopolis.ru

В работе представлена методология решения волнового уравнения для прямой задачи и обратной полноволновой инверсии на основе физически информированных нейронных сетей (PINN). Этот подход основан на интеграции физических законов в архитектуру нейронных сетей для решения задач моделирования и инверсии в геофизике. В частности, PINN используют дифференциальные уравнения математической физики в частных производных в качестве дополнительных ограничений при обучении нейронных сетей. Это позволяет учитывать физические законы, управляющие распространением волн, напрямую в процессе оптимизации модели, что значительно снижает зависимость от большого объема меток данных, обычно требуемых для традиционных нейронных сетей. Данный подход демонстрирует значительный потенциал для моделирования физико-механических свойств среды.

Исследована возможность применения архитектуры PINN к акустическим волновым уравнениям с проверкой на моделях с различными степенями структурной сложности. Благодаря бессеточной формализации PINN обеспечивается гибкость в реализации волновых уравнений и различных граничных условий, таких как автоматически удовлетворяемые условия поглощающих границ, что является сложной вычислительной задачей для традиционных решателей волнового распространения.

На синтетических примерах продемонстрирована способность PINN эффективно обрабатывать разнообразные неоднородности структуры среды с использованием как телесейсмических квазиплоских волн, так и точечных сейсмических источников. Результаты показывают, что современные PINN обеспечивают хорошие результаты как при решении прямой, так и обратной задачи геофизики при ограниченной вычислительной сложности.

Рассмотрены текущие ограничения метода при работе со сложными скоростными моделями, а также стратегии по преодолению этих проблем. Например, PINN показывают хорошую производительность даже при отсутствии априорных знаний или начальной модели, а также способны эффективно реализовать заданные ограничения на распределение скоростей.

ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ РАССОХИНСКОГО И БАЛАХНИНСКОГО МЕГАВАЛОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РЕГИОНАЛЬНЫХ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАБОТ В ЕНИСЕЙ-ХАТАНГСКОМ РЕГИОНАЛЬНОМ ПРОГИБЕ

Обухов А. Н.¹, Корнеев А. А.², Каламкарров С. Л.³, Лошакова И. Ф.⁴, Иванова С. Р.⁵

1, 2, 3, 4, 5 – ФГБУ «ВНИГНИ», г. Москва, Россия; e-mail: obukhov@vnigni.ru

По новым геолого-геофизическим данным, полученным в Енисей-Хатангском региональном прогибе (ЕХРП) за последние 10 лет построены новые и актуализированы существующие структурные карты (материалы сейсмических съемок с учетом новых гравимагнитных данных). На этой основе проведен структурно-тектонический анализ развития инверсионных мезозойских Рассохинского и Балахнинского мегавалов, осложняющих осевую часть ЕХРП. Эти мегавалы совпадают также с Енисей-Хатангским рифтом, восточной ветви Колтогорско-Уренгойского рифта.

Предлагаемый доклад посвящен обоснованию развития структур сжатия в геоструктуре глобального растяжения. Северная пассивная окраина Сибирского континента в конце пермского - начале триасового периодов подверглась рифтингу. В результате обширный Таймырский фрагмент был отодвинут на север на 50-70 км. По авторским палеотектоническим и палеогеографическим построениям обоснованы главные тектоно-седиментационные события: смена обширной шельфовой преимущественно карбонатной формации (PZ₁₋₂-C₁) на окраинно-континентальную дельтовую терригенную (C₂-P₂), далее на рифтовую осадочно-вулканическую (P₃-T₁). Узкая субширотная синрифтовая формация терригенного триаса (T₂₋₃) ознаменовала заложение ЕХРП, происходящее синхронно со складчатостью Таймыра. С юры начался основной этап формирования осадочного чехла ЕХРП с неокомским эпизодом некомпенсированного прогибания в Агапском прогибе и почти синхронной инверсией по оси прогиба. Поднятия центральных мегавалов начались с позднего мела с максимумом в олигоцене – неогене. Причем поднятия происходили на фоне постоянного регионального прогибания, без выхода валов выше поверхности эрозии. Каждый этап прогибаний в ЕХРП инициировал поднятие валов. Вся эта история детально прослеживается и документируется на сейсмических профилях. В бортовых зонах ЕХРП в осадочном чехле полностью отсутствуют деформации сжатия. Постоянно существующий региональный уклон бортов инициирует гравитационно-геодинамический слайдинг (оползание) осадочного чехла в осевую зону. Гравитационно-геодинамические срывы продолжались в течение всей истории прогиба, начиная с конца триаса, усиливаясь в середине мела, в конце олигоцена и в плиоцен-четвертичное время и по различным detachments. Срывы объясняют инверсионную структуру и асимметрию Рассохинского (южная) и Балахнинского (северная) мегавалов. Обоснование представлено на региональных сейсмогеологических профилях и на структурных и палеогеографических картах. Результаты работы используются для прогноза нефтегазоносности перспективных центральных зон ЕХРП.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СДВИГОВОГО РАЗРУШЕНИЯ СИЛЬНО НАПРЯЖЕННОГО МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

Одинцев В. Н.¹, Макаров В. В.²

¹ – *Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г. Москва, Россия;*
e-mail: Odin-VN@yandex.ru

² – *Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия*

Исследования сдвигового разрушения горных пород актуальны как в связи с проблемами тектонофизики, так и проблемами безопасности горных работ на глубоких рудниках, где напряжения в породе близки к ее прочности. Вблизи протяженных выработок происходит разрушение массива пород в виде отрыва и сдвига, которое не объясняется в рамках традиционных представлений о разрушении сжатых материалов. Важные данные о сдвиговом разрушении, которое можно охарактеризовать как трещину сдвига лишь условно, состоят в следующем. (1) Направление развития трещины может постепенно изменяться, в итоге поверхность трещины длиной более десяти метров не является плоской. (2) По мере увеличения выработанного пространства последовательно возникающие сдвиговые трещины растут близко одна к другой (на расстоянии порядка метра). В результате в массиве образуется множество трещин, взаимное влияние трещин проявляется слабо. (3) Трещина не является именно поверхностью разрыва структурных связей, а представляется неровным нарушенным слоем толщиной нескольких сантиметров. (4) Рост трещин обычно происходит в динамическом режиме в виде горного удара.

Для объяснения этих особенностей сдвигового разрушения построена математическая модель условной трещины сдвига. Используются современные представления об образовании у конца трещины в материалах с зернистой структурой зоны «активного» разрушения (fracture process zone), где происходит частичная дезинтеграция материала. Для короткой трещины рассматривается плоский разрез в упругой среде и решаются задачи для сдвиговых и нормальных напряжений. В концевой области разреза, моделирующей зону активного разрушения, введены нормальные и касательные псевдоусилия. С их помощью отражаются эффекты дилатансии и разворота фрагментов породы в зоне дезинтеграции материала, для простоты они линейно связаны с внешней нагрузкой. В центральной части трещины задаются постоянные нормальные и сдвиговые смещения породы, которые отражают последствия дезинтеграции материала, произошедшей в зоне активного разрушения. Положение границы зоны активного разрушения определяется равенством смещений на границе области их критическим значениям. Условие развития трещины определяется условием Гриффитса-Ирвина, в которое входят напряжения от нормальной и сдвиговой нагрузки.

Построено математическое решение задачи. Особо рассмотрен случай увеличения протяженности трещины, т.е. перехода от короткой трещины к длинной макротрещине. Показано, что для макротрещины возможен режим развития за счет автономного продвижения концов трещины при постоянной внешней нагрузке и фиксированном статическом состоянии материала в центральной части. Этот вывод, подтвержденный оценками с помощью МКЭ, позволяет объяснить отмеченные выше особенности сдвигового разрушения массива пород вблизи глубоких выработок.

О ВОЗМОЖНОСТИ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ГОРНЫХ УДАРОВ НА РУДНИКАХ

**Осика В. И.¹, Калашников Н. В.², Кочетков Б. М.³, Ловчиков А. В.⁴, Павлов Е. И.⁵,
Рахимов Р. Г.⁶**

^{1,3} – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: osika@ifz.ru*

^{2,6} – *Ловозерский ГОК, пгт. Ревда, Россия*

³ – *ООО «НПЦ Бау – Мониторинг», г. Москва, Россия*

⁴ – *Горный институт Кольского научного центра РАН, г. Апатиты, Россия*

В работе изложены результаты многолетних наклономерно-деформометрических работ на рудниках Кольского полуострова. Основная характерная особенность тектонических условий Кольского полуострова – сильное сжатие горного массива. Это позволяет значительно экономить силы и средства при прокладке основных штолен, т.к. не требуется дополнительной крепи стен и потолков. Напряженное состояние пород вокруг подземных выработок рудников Кольского п-ва создается, главным образом, тектоническими силами современных горообразовательных процессов в литосфере, действующими горизонтально, которые обычно в 5-10 раз (до 20 раз) превышают по величине гравитационные напряжения на соответствующей глубине. Сильные подземные толчки с магнитудой до $M=6$ происходят на Кольском полуострове редко. В последние несколько лет авторами были получены экспериментальные подтверждения возможности краткосрочного прогноза слабых горных ударов на руднике «Карнасурт» Ловозерского горного комбината.

ОРИЕНТАЦИОННАЯ ПРИРОДА ОТКЛИКА ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ В ПРИРАЗЛОМНОЙ ЗОНЕ НА ПРОХОЖДЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН: ТЕОРИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ

Пантелеев И. А.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, Россия

Для описания возможного отклика порового давления в приразломной зоне на прохождение сейсмических волн от сильных удаленных землетрясений авторами построена теоретическая модель пороупругой трещиноватой среды. В основе разработанной модели лежит явление анизотропии пороупругих свойств, индцированной микротрещиноватостью породы, преимущественная ориентация которой определяется кинематикой активной разломной зоны. Предложено обобщение уравнения Скемптона для недренированного состояния трещиноватой породы, определяющего связь порового давления флюида с величиной ее объемной и сдвиговой деформации, на случай зависимости коэффициентов уравнения от компонент тензора поврежденности второго ранга. Введение тензора поврежденности, с одной стороны, позволяет описать преимущественную ориентацию трещиноватости породы, и индуцированную ей анизотропию механических свойств. С другой стороны, позволяет напрямую связать величину изменения порового давления, вызванного прохождением сейсмических волн, с их азимутом, углом падения и углом поляризации (для сдвиговых волн).

На основе многопараметрических численных расчетов установлено, что все возможные сценарии отклика порового давления флюида в районе активной разломной зоны на прохождение сейсмических волн, определяются взаимной ориентацией сдвиговой разломной зоны, микротрещиноватости в ее окрестности, осей максимального и минимального горизонтальных напряжений, действующих в горном массиве, а также направлением прихода сейсмической волны и ее поляризацией.

Верификация разработанной теоретической модели заключалась в описании азимутальной зависимости отклика порового давления на прохождение сейсмических волн от разноудаленных сейсмических событий, установленной сотрудниками Американской геофизической службы в результате комплексного скважинного мониторинга резервуара сброса сточных вод Арбакл (Оклахома, США) (Arbuckle wastewater disposal reservoir, Oklahoma, USA). Показано, что искомая азимутальная зависимость с высокой точностью описывается разработанной моделью.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 19-77-30008.

ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ИНОВА: ОТ ИСТОКОВ К СОВРЕМЕННОМУ СОСТОЯНИЮ

Патонин А. В.¹, Пономарев А. В.², Шихова Н. М.³

^{1,3} – Геофизическая обсерватория «Борок» Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН,

г. Борок, Россия; e-mail: patonin_borok@mail.ru

² – Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

Доклад посвящен этапам совершенствования электрогидравлической системы ИНОВА, предназначенной для лабораторных испытаний образцов горных пород в условиях одноосного и трехосного нагружения. Рассматриваются задачи геомеханики и способы их решения с помощью программно-управляемого комплекса Инова в Геофизической обсерватории «Борок» за период от момента установки и до сегодняшних дней. Приводятся технические характеристики гидравлической системы и измерительных комплексов, входящих в состав лабораторного комплекса. Особое внимание уделяется развитию аппаратно-программного оснащения, позволяющего контролировать весь ход испытания и получать данные с тензометрических и акустических датчиков. Рассматриваются детали систем регистрации сигналов акустической эмиссии и ультразвукового зондирования. Обсуждаются пути и методы повышения качества и точности измерения акустических параметров и определения координат источников сигналов акустической эмиссии. Отдельное внимание уделено современному состоянию измерительного комплекса на базе управляемого пресса Инова, этапам обработки получаемой информации, методам синхронизации данных, алгоритмам локации, построению поля скоростей распространения упругих волн и определению механизмов источников сигналов акустической эмиссии. Рассматриваются возможности проведения экспериментов с различными режимами нагружения в условиях всестороннего и порового давлений. В заключении рассматриваются основные направления дальнейших аппаратно-программных решений.

ПАРАМУШИРСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 25 МАРТА 2020 ГОДА

Полец А. Ю.

*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия;
e-mail: polec84@mail.ru*

25 марта 2020 года, примерно в 220 км от о. Парамушир, Северные Курильские острова, произошло сильное землетрясение, моментная магнитуда $M_w = 7.5$. Очаг располагался на глубинах $\sim 30 - 60$ км (граница коры и мантии с астеносферой), на океаническом склоне глубоководного желоба, в области перегиба Тихоокеанской литосферной плиты. Тип механизма очага – взброс.

Сильные землетрясения подобные событию 25 марта 2020 года являются достаточно редкими в океаническом склоне желоба. В переходных зонах между континентами и океанами большинство землетрясений происходит под континентальным склоном желоба, в осевой зоне желоба и океаническом склоне отмечается аномально низкая сейсмическая активность земной коры. Единичные случаи высокой активности на склоне и краевом валу расцениваются как признаки постепенной миграции сейсмической зоны от континентального склона к океаническому.

Большинство землетрясений сейсмической полосы вдоль вала Зенкевича являются мелкофокусными, со сбросовым типом механизма очага. Для глубин $30 - 60$ км характерны взбросовые механизмы. Последними сильными землетрясениями на океаническом склоне в Курило-Охотском регионе были землетрясения 13 января 2007 г., $M_w = 8.1$ (тип подвижки в очаге сброс) и 15 января 2009 г., $M_w = 7.4$ (тип подвижки в очаге сброс).

Для реконструкции поля современных тектонических напряжений перед сильным Парамуширским землетрясением 25 марта 2020 г. применялся метод катакластического анализа разрывных смещений [Ребецкий, 2007]. Реконструкция выполнялась по данным о механизмах очагов землетрясений [<https://www.globalcmt.org/>] для разных глубинных и временных интервалов.

Полученная ориентация осей главных напряжений характерна для субдукционных зон: проекции осей максимального девиаторного сжатия и растяжения ориентированы ортогонально простиранию Курильского желоба, ось промежуточного главного напряжения вдоль простирания желоба. Установлено практически повсеместное наличие обстановки горизонтального сжатия на глубинах $0 - 30$ км и $30 - 60$ км перед Парамуширским землетрясением 25 марта 2020 г.

ИЗУЧЕНИЕ СТРОЕНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ ПАССИВНОЙ СЕЙСМИКИ

Преснов Д. А.¹, Котов А. Н.², Нуждаев И. А.³, Тощов С. А.⁴

^{1,2,4} – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия;*
e-mail: presnov@physics.msu.ru

³ – *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия*

Возросший интерес к возобновляемым источникам энергии позволяет по-новому подходить к решению задачи планирования строительства геотермальных электростанций с использованием современных технологий сейсморазведки. Как известно, достаточно высокая стоимость строительства ГеоЭС обусловлена в основном проведением геологоразведочных работ с бурением поисковых скважин. Альтернативой такому подходу может быть использование детальной сейсморазведки, которая в пассивном варианте является относительно недорогой. Пассивные методы сейсморазведки основаны на анализе фоновых микросейсмических шумов и не требуют применения специальных сейсмических источников. Зародившиеся около 20 лет назад микросейсмические методы сегодня активно применяются по всему миру для построения изображений глубинного строения геологической среды, в том числе при поиске месторождений полезных ископаемых.

В настоящем исследовании анализируются данные полевых геофизических работ, выполнявшихся авторским коллективом в южной части Камчатского полуострова в 2023-2024 годах. С использованием широкополосных автономных сейсмических станций проведены временные сейсмологические наблюдения вдоль профиля, длина которого превышает 20 км. Это позволяет применить методы пассивной сейсмики, такие как: микросейсмическое зондирование, сейсмическая интерферометрия и Н/V. Целью геофизических изысканий является уточнение глубинного строения флюидно-магматических систем, ассоциированных с вулканами Камбальный и Кошелева. Отметим, что на территории пробурено большое количество скважин для добычи термальных вод в хозяйственных и курортно-оздоровительных целях. А также существует немало научных трудов, посвященных исследованию геотермальных месторождений на юге Камчатки различными геолого-геофизическими методами. В результате имеющиеся данные о геологическом строении геотермальных месторождений сопоставляются с полученными по данным пассивной сейсмики моделями.

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ТЕКТОНОФИЗИКИ В РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

Ребецкий Ю. Л.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: reb@ifz.ru

В докладе будут представлены достижения отечественной тектонофизики, полученные в самые последние годы в области изучения природных напряжений и оценки сейсмической опасности. Исходными данными для расчета напряжений служат сейсмологические и геологические индикаторы разрывных деформаций. Возможность оценки сейсмической опасности связана с созданным в методе катакластического анализа разрывных смещений (МКА) алгоритмом оценки величин напряжений или нормированных напряжений. В этой части МКА обогнал в своем развитии все методы, как в России, так и за рубежом.

Данные о нормированных на прочность сцепления напряжениях позволяют развивать тектонофизические методы детерминированного прогноза мест формирования сильных землетрясений, основы которого в шестидесятые годы прошлого века заложил основатель тектонофизики в СССР М. В. Гзовский. Основы такого прогноза предлагается строить на принципах тектонофизического районирования опасных участков крупных региональных разломных систем. В результате такого районирования на разломах выделяются зоны разного уровня положительных значений кулоновых напряжений, которые подразделяются на разные по степени опасности участки. Значения кулоновых напряжений, определяемых как разность между касательными напряжениями на разломе и напряжениями сил трения, с одной стороны определяют близость состояния на разломе к критическому, а с другой характеризуют уровень энергии, высвобождающейся в упругих волнах.

В настоящее время для трех крупных регионов выполнено тектонофизическое районирование опасных участков разломов: Западный Сычуань (КНР), Восточно-Анатолийская зона Турции, Байкальская рифтовая система. Первые два региона с произошедшими в них сильными землетрясениями (Веньчуанское $M=8.2$, 2008 г и Пазарджикское 7.8, 2023 г) позволили впервые увидеть закономерность изменения кулоновых напряжений в очаговых областях. Районирование в БРС позволило впервые дать долговременный прогноз опасных участков разломов.

В докладе также будут описаны алгоритмы тектонофизического расчета энергетических затрат при землетрясениях, позволяющих разрабатывать методы мониторинга состояния разломов.

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ОТКРЫТОЙ ТРЕЩИНОВАТОСТИ В ОСАДОЧНЫХ БАССЕЙНАХ

Ребецкий Ю. Л.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: reb@ifz.ru

Показано, что формирование ортогональных систем открытых макротрещин (отрывы) осадочных бассейнов может происходить на стадии диагенеза за времена первых сотен лет для небольшого диапазона глубин шельфа (до 100 м) в процессе осадконакопления. В этот период идет уплотнение осадков и медленное отжатие излишков воды, определяющее уменьшение упругого коэффициента Пуассона от значений, близких к 0.5 до значений 0.3-0.2. Из-за этого в осадках, напряженное состояние которых практически полностью определяется только силой тяжести вышележащих пород, происходит снижение на 50% и более уровня напряжений горизонтального сжатия от начального литостатического уровня давления. С другой стороны, в случае достижения предела псевдопластического течения в породе происходит вертикальное уплотнение, сопровождающееся ростом горизонтального сжатия. Эти два конкурирующих процесса вместе с фактором флюидного давления в трещинах и порах определяют возможность формирования хрупких трещин отрыва. Показано, что для пород, имеющих низкий уровень предела текучести (глины), уплотнение приводит к повышению уровня напряжений горизонтального сжатия, из-за чего хрупкое разрушение в таких породах на стадии диагенеза становится невозможным. В породах, обладающих высоким уровнем сдвиговой прочности (песчаник, известняк), хрупкое разрушение из-за превышения давления воды в субвертикальных микротрещинах начинается раньше, чем достижение предела текучести.

О ФИЗИКЕ РАЗНОГЛУБИННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ – ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ПРОГНОЗА

Родкин М. В.

*Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва, Россия;
Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия; e-mail: rodkin@mitp.ru*

Давно известен парадокс сейсмичности, что процесс хрупкого разрушения невозможен при РТ условиях, отвечающих глубинам более нескольких десятков километров. Известно было также, что оценки действующих тектонических напряжений дают значения много меньше необходимых для разрушения горных пород. Для объяснения парадокса были предложены модели, связывающие генезис более глубоких землетрясений с охрупчиванием пород при наличии высоконапорного глубинного флюида и с фазовыми переходами. Однако эти представления практически не подкреплялись данными о параметрах разноглубинной сейсмичности; разноглубинные землетрясения представлялись как-бы неразличимыми по своим характеристикам. Была известна разве только концентрация глубоких землетрясений вблизи границ основных фазовых превращений в погружающихся плитах.

Представлены данные, свидетельствующие о прекращении обычной сейсмичности на глубинах нескольких десятков километров и о существовании в очаговых областях среднеглубоких землетрясений флюидной компоненты малой плотности. Также приводятся свидетельства отличия параметров очагов глубоких и среднеглубоких землетрясений, подкрепляющие фазовую модель глубокой сейсмичности. Различие параметров очагов приповерхностных, обычных, среднеглубоких и глубоких землетрясений использованы как дополнительные характеристики в новом алгоритме прогноза землетрясений, базирующемся на использовании совокупности средних прогнозных аномалий, детально описанных по результатам анализа обобщенной окрестности сильного землетрясения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 23-27-00395 «Комплекс аномалий в обобщенной окрестности сильного землетрясения; физика процесса и использование в целях прогноза»).

ТЕКТОНИЧЕСКИЕ, МАГМАТИЧЕСКИЕ И МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЮЖНОГО КАСПИЯ И СОПРЕДЕЛЬНЫХ СТРУКТУР

Романько А. Е.¹, Имамвердиев Н. А.², Викентьев И. В.³, Рашиди Б.⁴, Хейдари М.⁵,
Полещук А. В.⁶, Савичев А. Т.⁷

^{1, 6, 7} – Геологический институт РАН, г. Москва, Россия; e-mail: a-romanko@ya.ru

² – Бакинский Государственный Университет, г. Баку, Азербайджан

³ – Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
г. Москва, Россия

⁴ – Satrap Resources (Satrap Resources), г. Перт, Австралия

⁵ – Университет Исфахана, г. Исфахан, Иран

Проведен совместный анализ тектоники, магматизма, металлогении и углеводородов (УВ: нефть – газ) для Южного Каспия – Западного Белуджистана, Ближний Восток (в основном альпийское время). Различные аномалии и дегазация представляют особый интерес. Отмечен специфический аномальный глубинный режим и дегазация CH_4 , H_2 и т. д. из-за активности гигантского Африканского суперплюма. Обсуждаются:

1. Альпийская северо-восточная (СВ) тектоническая зональность существует в регионе. Аномальная долгоживущая (с юры – как минимум) активность Африканского суперплюма влияет на тектонику, связанный с ним магматизм, флюидный режим и существенно магматическую металлогению. В регионе наблюдаются различные аномалии, включая гравитационную таковую.

2. Миоцен – современный ($\text{N}_1\text{-Q}$) внутриплитный магматизм с: различными субщелочно-щелочными породами, напрямую связанными с упомянутым суперплюмом. Имеются данные о поступлении Sr, Ca и т. д. в верхние более молодые отложения Каспийского моря из нижних более древних магматитов. Существует такой магматический тренд, как: четвертичные карбонатиты, Ханнешин, блок Гильменд (Афганистан) - вулканиты, богатые Ca, с содержанием CaO до 34.8% - трахиандезиты с содержанием CaO = 7.2%.

3. Оligоцен-современные ($\text{Pg}_3\text{-Q}$) известково-щелочные субдукционные породы являются антиподами упомянутых внутриплитных пород (интрузивных, экструзивных и вулканокластических). Связь с Африканским суперплюмом формально не обязательна, но есть наши данные о более теплых известково-щелочных породах здесь, например, теплые расплавные включения в них с T кристаллизации 1180°C.

4. Снижение сейсмической активности с юга на Средний Каспий, по крайней мере [Хаин, Богданов, 2003 и др.]. Ресурсы УВ уменьшаются от Персидского залива к С. Каспию.

5. Зональность УВ - меньшего порядка (с запада на восток: нефть – газ) в Ю-М Каспии существует. Является ли Большой Кавказ барьером для УВ меньшего порядка?

6. Существует региональная тектоническая – УВ корреляция в Ираке, Южном Каспии, Туркменистане: больше сжатия и нефти на западе региона против меньшего сжатия и газа на востоке региона вплоть до восточного Туркменистана, однако, с неглубокими морскими условиями (переходные фации) в последнем. Более того, необычное многократное повторение нефти – газа – газоконденсата в разрезе обнаружено в 3. Туркменистане. Является ли это также результатом поступления глубинных флюидов? Поведение и зональность УВ не совсем ясны в этом уникальном регионе.

7. Другая основная зональность УВ с севера на юг (С-Ю) такова: УВ в породах: девон-палеоген (D-Pg) – С. Каспий: триас-юра, палеоген – Ср. Каспий и нижний плиоцен ($\text{N}_2 - 1$) – Ю-Каспий. Это согласуется с уменьшением активности суперплюма на С-СВ.

Гигантские ресурсы УВ в регионе Саудовская Аравия–Каспий могут быть связаны с этим эндогенным режимом. Локализация УВ согласуется в целом с тектоникой. По-видимому, генезис нефти традиционный – органический, но при явном участии глубокого компонента. На детальном структурных картах однозначно фиксируется максимум УВ. Это согласуется с молодой – кайнозойской локализацией УВ, несмотря на разный возраст вмещающих пород. Грязевые вулканы [Холодов, 2012 и др.] – УВ (нефть-газ) – соль – магматизм – тектоника – это ОДНА важная система в изучаемом регионе.

Исследование выполнено по планам госзадания Геологического института РАН.

О МИНИМАЛЬНОЙ МАГНИТУДЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, ОТКЛИК НА КОТОРЫЕ РЕГИСТРИРУЕТСЯ В НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЕ

Рябова С. А.¹, Шалимов С. Л.²

¹ – *Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, г. Москва, Россия;
Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: riabovasa@mail.ru*

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

В настоящей работе исследованы возмущения магнитного поля Земли, наблюдавшиеся после сильного землетрясения у острова Минданао (Филиппины) 2 декабря 2023 г. и его сильных афтершоков. Проведенный с использованием данных наземного магнитометра на станции Давао анализ ионосферных откликов на землетрясения с магнитудой до 5.9 показал, что сама возможность их регистрации магнитометрическими средствами позволяет надеяться на заметное снижение порога регистрации по магнитуде событий (установленного ранее посредством ГНСС-радиопросвечивания и равного $M=6.5$), отклик на которые еще может быть зарегистрирован в ионосфере. При этом наблюдается устойчивая картина появления ионосферных возмущений от события к событию с различными магнитудами, причем выделенные ионосферные аномалии хорошо интерпретируются в терминах распространяющихся сейсмических волн Релея и атмосферных акустико-гравитационных волн.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИДГ РАН № 1220329000185-5 «Проявление процессов природного и техногенного происхождения в геофизических полях» и в рамках государственного задания ИФЗ РАН.

КОМПЛЕКСНОЕ ИЗУЧЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОГО МАССИВА АНГАРАКАН-МУЯКАНСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ (СЕВЕРО-ВОСТОЧНЫЙ ФЛАНГ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ СИСТЕМЫ)

Саньков В. А.¹, Мирошниченко А. И.², Саньков А. В.³, Парфеев А. В.⁴,
Добрынина А. А.⁵, Лебедева М. А.⁶, Ефимов Е. Ю.⁷

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} – *Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия; e-mail: sankov@crust.irk.ru*

⁷ – *ООО "ВолксКруп-АЕ", г. Санкт-Петербург, Россия*

На примере детально изученного Ангаракан-Муяканского горста Верхнеангарско-Муйской междупадинной перемычки северо-восточного фланга Байкальской рифтовой системы, где расположен Северомуйский тоннель БАМ, выявлены закономерности развития позднекайнозойского и современного напряженно-деформированного состояния земной коры, полученные с использованием данных геолого-структурных, сейсмологических и геодезических (наземных и спутниковых) методов исследований.

Реконструкции стресс-тензоров палеонапряженного состояния показали, что позднекайнозойское напряженное состояние земной коры эволюционировало от сдвигового типа на стадии заложения разломов к чистому растяжению. При этом ось минимального сжатия имела С-СЗ простирание и залегала горизонтально.

Стресс-тензоры, рассчитанные по данным о механизмах очагов землетрясений, также указывают на современные условия растяжения в том же направлении. Как в среднем для всего разреза коры до глубины 16 км, так и для отдельных слоев, характерны условия растяжения – ось минимального сжатия (растяжения) σ_3 современного стресса субгоризонтальна и направлена на С-СЗ, ось максимального сжатия σ_1 – субвертикальна, а ось промежуточных напряжений σ_2 горизонтальна и имеет В-СВ направление.

Впервые с использованием сопоставления данных наземных полигонометрических измерений и современных измерений методом спутниковой геодезии удалось оценить относительную скорость горизонтального удлинения земной поверхности на Северомуйском геодинамическом полигоне в пределах Ангаракан-Муяканского блока за 36-летний период, которая составила первые единицы на 10^{-7} в год в направлении 300-350°. Измерения, проведенные ранее, на локальных полигонах с характерной длиной базовых линий в первые километры за 3-х летний период показали более интенсивные (на 1-2 порядка) разнонаправленные горизонтальные деформации.

На территории Северомуйского полигона впервые удалось измерить величину вертикальных смещений, вызванных проявлением интенсивного роя землетрясений. С применением метода радарной интерферометрии по данным анализа интерферограмм ALOS-2/PALSAR-2 за период 26.09.2015 – 27.09.2014, в пределах Муяканского хребта был локализован участок размером 8.0 x 4.0 км, испытавший опускание с амплитудой 68 мм в период роевой активности в верхней части земной коры.

ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ В ТУРЦИИ 2023 ГОДА И СЕЙСМОГЕОДИНАМИКА КАВКАЗСКО-АНАТОЛИЙСКО-АРАВИЙСКОГО РЕГИОНА

Свалова В. Б.

Институт геоэкологии имени Е. М. Сергеева РАН, г. Москва, Россия; e-mail: v-svalova@mail.ru

Землетрясение магнитудой 7.8 произошло на юго-востоке Турции 6 февраля 2023 года. Место землетрясения связано с тройным сочленением Анатолийской, Аравийской и Африканской плит и приурочено к Восточно-Анатолийскому разлому, который образует границу между Анатолийской и Аравийской плитами.

Северо-Анатолийский разлом разделяет Евразийскую и Анатолийскую тектонические плиты, скользящие относительно друг друга со скоростью 2 см в год. Вдоль него постоянно происходят землетрясения, и активность постепенно смещается все дальше на запад, в Мраморное море, в сторону Стамбула. Сегмент этой зоны, примыкающий к городу, не активировался 250 лет.

Построение геодинамических моделей глубинного строения районов стихийных бедствий является важным вкладом в изучение активных континентальных окраин, что необходимо для предупреждения, предсказания и прогнозирования землетрясений, оценки геоэкологических рисков и подготовки действий населения в случае стихийных бедствий и катастроф.

Геодинамическая модель Кавказско-Анатолийского региона определяется мантийным потоком, поднимающимся с поверхности ядра и распространяющимся под литосферой, создавая сложные поверхностные скорости в Анатолии на запад, в Аравийской плите на восток и на Кавказе на север. Этот поток будет продолжать перемещать вещество вдоль Северо-Анатолийского и Восточно-Анатолийского разломов.

Существует разная частота сильных землетрясений вдоль разломов, что объясняется различной толщиной коры и различной реологией геологической среды разломов. Глубина границы Мохо Восточно-Анатолийского разлома около 40 км, а Северо-Анатолийского около 50 км. Вдоль Северо-Анатолийского разлома сильные землетрясения происходят каждые 1-10 лет (1939, 1942, 1943, 1944, 1953, 1957, 1966, 1967, 1971, 1992, 1999) с расстоянием между гипоцентрами около 100 км с направлением на запад. Поскольку Измитское землетрясение 1999 г. произошло в 80 км к востоку от Стамбула, ждать землетрясения в районе Стамбула можно через несколько лет (1-10 лет).

Так как Восточно-Анатолийский разлом произвел сильные землетрясения 1789 (М 7.2), 1795 (М 7.0), 1872 (М 7.2), 1874 (М 7.1), 1875 (М 6.7), 1893 (М 7.1), 2020 (М 6.8), 2023 г. (М 7.8, М 7.7), то повторяемость групп (1790 – 1880 – 2020) около 100 лет. Но внутри групп бывает 2-4 близких по времени сильных землетрясения. Можно прогнозировать, что сильное землетрясение на Восточно-Анатолийском разломе, если не произойдет через 1-2 года, то произойдет только через 100 лет.

Финансирование: Работа выполнена в рамках госзадания № 122022400105- 9 по теме «Прогноз, моделирование и мониторинг эндогенных и экзогенных геологических процессов для снижения уровня их негативных последствий».

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ГЕОДИНАМИКА И НЕФТЕГАЗОНОСНОСТЬ КАВКАЗСКО-КАСПИЙСКОГО И КАРИБСКО-МЕКСИКАНСКОГО РЕГИОНОВ

Свалова В. Б.

Институт геоэкологии имени Е. М. Сергеева РАН, г. Москва, Россия; e-mail: v-svalova@mail.ru

В связи с высокой степенью разведанности и выработанности запасов углеводородов, особенно нефти, в основных нефтегазоносных провинциях Российской Федерации, все более острой становится проблема прогнозирования и разведки новых месторождений на больших глубинах.

В последние годы в Мексиканском заливе и бразильском секторе Атлантики обнаружены крупные месторождения нефти на глубинах до 10 км.

В этой связи большой интерес представляет сравнение геодинамической истории формирования и эволюции геологических и нефтегазоносных структур Альпийско-Гималайского пояса и Карибско-Мексиканского региона, в частности, Прикаспийской впадины и Мексиканского залива.

Формирование и эволюция геологических структур отражают взаимодействие литосферы и астеносферы в процессе движения литосферных плит. Значительный вклад в формирование бассейнов Альпийского пояса и Карибского бассейна вносит мантийный диапиризм. Мантийные диапиры возникают в результате инверсии плотности в системе астеносфера-литосфера. Такая инверсия стала движущей силой подъема отдельных диапиров на фоне конвергенции Африки и Евразии (в случае Альпийского пояса) и Северной и Южной Америки (Карибский регион). В Альпийском поясе мантийный диапиризм формирует новые бассейны межконтинентальных морей на заключительном этапе конвергенции Африки и Евразии в кайнозое. В Карибском регионе интенсивный мантийный плюм сначала разъединил Северную и Южную Америку в мезозое, а затем сыграл ту же роль, что и плюм в Альпийском поясе при сближении континентов в кайнозое, формируя впадины Карибского бассейна над отдельными мантийными диапирами.

Можно сравнить развитие Мексиканского залива с Прикаспийской впадиной в связи с Альпийским поясом, когда импульсы мантийной активности сформировали новые осадочные бассейны. Как впадина Мексиканского залива старше впадин Карибского моря, так и Прикаспийская впадина старше Южно-Каспийской впадины и бассейнов Средиземноморья. Сейсмотомография фиксирует мантийный диапир в Карибском бассейне. Разработанная термогравиметрическая модель литосферы дает возможность оценить уровень подъема мантийного диапира под осадочным бассейном на примере Прикаспийской впадины.

Финансирование: Работа выполнена в рамках госзадания № 122022400105- 9 по теме «Прогноз, моделирование и мониторинг эндогенных и экзогенных геологических процессов для снижения уровня их негативных последствий».

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РАЗРЫВНЫХ СТРУКТУР РАЗЛИЧНЫХ МАСШТАБНЫХ УРОВНЕЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ РАЗВИТИЯ ВТОРИЧНЫХ СТРУКТУР В ЗОНЕ СКОЛА П. Л. ХЭНКОКА

Свечеревский А. Д.¹, Устинов С. А.²

^{1,2} – *Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
г. Москва, Россия; e-mail: alexey@svecherevskiy.ru*

Для реконструкции параметров поля напряжений-деформаций (ПНД), установления кинематики основных разломов и стадий формирования каркаса разрывных структур разных порядков в соответствии с масштабным уровнем объекта исследования могут применяться различные тектонофизические модели формирования парагенезиса оперяющих трещин магистрального разрыва в зоне сдвига. Комплексный подход при моделировании зон сдвига и близких к ним зон скалывания и отрыва до возникновения в них основного разрыва отражен в работах М. В. Гзовского. П. Л. Хэнкок приводит наиболее полную сводную схему рядов вторичных структур, наблюдаемых в зонах сдвига до образования в них магистрального разрыва и после его формирования.

Модели М. В. Гзовского и П. Л. Хэнкока, как наиболее комплексные, могут использоваться для интерпретации пространственного положения выявленных структур на различных масштабных уровнях (вплоть до микроуровня) с целью реконструкции ориентировки осей сжатия и растяжения в горизонтальной плоскости, определения направлений сдвигового перемещения по разломам (правый или левый) и воссоздания геодинамической обстановки формирования разлома (сжатия или растяжения). На модели М. В. Гзовского основывается структурно-геоморфологический (СГ) метод, предложенный д.г.-м.н. Л. А. Сим (ИФЗ РАН). Для автоматизации реализации данного метода сотрудниками ИФЗ РАН к.г.-м.н. Н. А. Гордеевым и к.ф.-м.н. А. Б. Молчановым создана программа «SimSGM». При этом на данный момент существует ряд вопросов, как к функционалу созданного программного продукта, так и к СГ-методу в части выявления и интерпретации вторичных оперяющих магистральный разлом структур. Авторами доклада создано программное обеспечение (ПО) «Lineament Stress Calculator» для интерпретации ориентировок выделенных структур разных порядков с использованием модели П.Л. Хэнкока. Функционал разработанного ПО опробован и его результаты верифицированы на различных масштабных уровнях: применительно к тектонофизической интерпретации линеаментов надрегионального, регионального, надлокального и локального уровней, выделяемых по цифровой модели рельефа, а также для реконструкции параметров ПНД в результате анализа выделяемых микроструктур в ориентированных прозрачно-полированных шлифах (микроуровень). Во всех случаях разработанное ПО позволило однозначно установить параметры ПНД, кинематику и типы структур разных порядков, а также черты их унаследованности на разных масштабных уровнях.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-77-10087, <https://rscf.ru/project/20-77-10087/>.

К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПОЛЯРНОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПО НАКЛОНЕНИЮ

Семаков Н. Н.

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, г. Новосибирск, Россия; e-mail: semakovnn@ipgg.sbras.ru

Данная публикация имеет целью привлечь внимание к необходимости более строгого подхода к определению полярности магнитного поля (особенно древнего) в тех случаях, когда нет достоверной информации о склонении вектора магнитной индукции или вектора древней остаточной намагниченности.

Понятие «магнитный полюс» в его традиционном восприятии как «точки на поверхности земного шара, в которой продолжение оси эквивалентного магнитного диполя ортогонально поверхности земной сферы», применимо лишь к смещенным радиальным диполям (а также к осевому и центральному диполям, которые «радиальны» по определению).

Угловые элементы земного магнетизма (склонение и наклонение вектора магнитной индукции в данной точки земной поверхности) нужны для определения географических координат магнитного полюса эквивалентного центрального диполя по всем известным формулам сферической тригонометрии.

Но нередко случаи, при которых достоверно известен только один из угловых элементов земного магнетизма: наклонение. Такая ситуация является обычной в палеомагнетизме при отборе ориентированных образцов из керна скважин и ударных трубок. В этом случае отсутствие информации о магнитном склонении может существенно сказаться на возможности и достоверности определения полярности магнитного поля.

Для обсерватории, расположенной на географической широте φ теоретически возможно любое значение наклонения от 90° до -90° . Но на практике картина выглядит более упорядоченно. В область неопределенности из приведённой в работе выборки попало соответственно 44 и 46 обсерваторий мировой сети из 108, работающих как в 2000 – 2020 годы, так и в 1950 – 1970 годы. Таким образом, для 60% магнитных обсерваторий современное магнитное поля однозначно имеет прямую полярность, даже если бы мы могли судить о ней только по углу наклонения. При этом следует обратить внимание на следующее обстоятельство: чем дальше точка наблюдения от географических полюса, то есть чем ближе она к экватору, тем меньше степень однозначности в определении магнитной полярности по наклонению. За последние полвека к этой области можно с уверенностью отнести всю площадь земного шара, расположенную между 45 градусами северной широты и 45 градусами южной широты. Значительная часть этой территории приходится на океанские просторы, что затрудняет контроль за измерением современных и древних значений углов склонения.

ЗОННО-БЛОКОВАЯ СТРУКТУРА И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА НА КРУПНЕЙШЕМ ГАЗОКОНДЕНСАТНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ СИБИРИ: ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

**Семинский К. Ж.¹, Бурзунова Ю. П.², Борняков С. А.³, Мирошниченко А. И.⁴,
Бобров А. А.⁵, Семинский А. К.⁶**

1, 2, 3, 4, 5, 6 – Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия; e-mail: seminsky@crust.irk.ru

Интенсивная эксплуатация месторождений углеводородов с относительно простым строением коллекторов привело к сокращению в мире запасов легко извлекаемого сырья. В этих условиях доминантой стратегии развития нефтегазовой отрасли в России становится переход к разведке и разработке месторождений в дислоцированных осадочных толщах. Неоднородность коллекторов на подобных объектах связана с наличием пластических и разрывных дислокаций, формы, проявления которых характеризуются определенной спецификой. В платформенных условиях породы чехла деформируются при умеренном воздействии тектонических и массовых сил, что приводит к формированию структур, не отчетливо выраженных на сейсмических разрезах и в других геофизических имиджах, являющихся основой для исследования строения осадочной толщи в пределах слабо обнаженных территорий. В докладе будут представлены результаты применения тектонофизического подхода к обработке и интерпретации комплекса геолого-геофизических данных по одному из крупнейших месторождений углеводородов в Сибири. Для района локализации месторождения установлен зонно-блоковый характер делимости породного массива, реконструированы локальные и региональные поля напряжений, выявлены этапы и механизмы деформации, обусловленные воздействием тектонических и гравитационных сил. Установленные закономерности обобщены в виде принципиальной тектонофизической модели осадочного чехла, которая отражает его напряженно-деформированное состояние, сформированное в ходе нескольких этапов тектогенеза. Модель может быть использована для аналогичных построений в пределах месторождений углеводородов со сложным строением платформенного чехла, а также для оценки напряженно-деформированного состояния участков предполагаемого строительства глубоких разведочных скважин.

БЛОКОВЫЕ ТЕКТОНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ РАЙОНА ЧУЙСКО-КУРАЙСКОЙ ВПАДИНЫ ГОРНОГО АЛТАЯ

Сим Л. А.¹, Маринин А. В.²

^{1,2} – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: sim@ifz.ru*

В пределах юго-восточной части Горного Алтая комплексом тектонофизических методов проведены исследования тектонических напряжений. Катакластическим методом Ю. Л. Ребецкого восстановлены тектонические напряжения в пределах Чуйской и Курайской впадин, включая разделяющий их Чаган-Узунский блок. Катакластический метод основан на закономерностях распределения векторов перемещений на зеркалах скольжения. Локальные стресс-состояния (ЛСС), восстановленные на указанной территории, были объединены по блокам и проанализированы методом определения региональных тектонических напряжений Л. А. Сим. Восстановленные катакластическим методом ориентировки осей главных нормальных напряжений показали значительное разнообразие, при котором горизонтальное сжатие свидетельствует как о субмеридиональном, так и субширотном положении указанной оси. В отдельных точках наблюдения восстановлены по две возможные ориентировки осей сжатия. Определение возрастных взаимоотношений разноориентированных осей главных нормальных напряжений затруднено из-за того, что все определения ЛСС произведены по бороздам скольжения, измеренным в породах палеозойского возраста. Два направления борозд скольжения на одной плоскости не дали возможности их расчленения по возрасту.

Для всего района произведено изучение напряженного состояния СГ методом, который основан на анализе новейших разломов и мелких прямолинейных элементов в зоне их влияния. Так как СГ метод опирается на анализ линеаментов, отдешифрированных по топографическим картам и космических снимков, возраст восстановленных тектонических напряжений принимается за неотектонический. Из 21 определения ЛСС, восстановленных указанным методом, 17 определений имеют меридиональные, север-северо-восточные и северо-восточные ориентировки горизонтальных осей сжатия, которые характеризуют деформирование новейших структур в установленном поле напряжений. СГ метод дает возможность определять геодинамическую обстановку формирования (активизации) разломов. В зонах 4-х разломов восстановлены геодинамические обстановки горизонтального сжатия.

Таким образом, можно утверждать, что структуры юго-восточной части Горного Алтая деформируются в неотектонический этап при субмеридиональном сжатии, меняющемся до северо-восточного, что согласуется с положением структуры в зоне влияния коллизии в этой части Азиатских структур.

МЕХАНИКА ОБРАЗОВАНИЯ СДВИГОВЫХ ПРОТЯЖЕННЫХ РАЗЛОМОВ В ЛЕДЯНОМ ПОКРОВЕ АРКТИКИ ПО НАТУРНЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ НА ДРЕЙФУЮЩИХ СТАНЦИЯХ «СЕВЕРНЫЙ ПОЛЮС». № 93

Смирнов В. Н.

*Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, Россия;
e-mail: smirnov@aari.ru*

Зарождение и развитие в морском льду Арктики протяженных гряд торошения на десятки и сотни километров, возникновение сдвиговых деформаций по стенкам вертикальных сжатых трещин являются одними из основных задач, связанных с природно-техногенным напряженно-деформированным состоянием арктического льда. Динамические процессы в сплоченном ледяном массиве сопровождаются накоплением напряжений, которые в дальнейшем могут реализоваться через многочисленные нарушения сплошности льда: термические и динамические трещины, сжатия и торошения, сдвиговые подвижки и явление автоколебаний в различных пространственных и временных масштабах.

Реологические свойства льда при таких процессах позволяют объяснить явления хрупкого разрушения ледяного покрова, процессов самоорганизации и образования упорядоченной структуры, отмечаемой на спутниковых снимках поверхности СЛО. Все возникающие динамические явления сопровождаются широким спектром волновых процессов, среди которых выделяются упругие горизонтально-поляризованные волны типа SH.

В настоящее время в Центральной Арктике действует дрейфующая станция СП-42, на которой используются методы сейсмометрических наблюдений динамики льда.

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ НЕИЗВЕСТНЫХ ПАЛЕОЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ВНУТРИГОРНЫХ ДОЛИН АЛТАЯ

Стрельников А. А.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: aas@ifz.ru

Алтайская горная система была создана в результате продолжающегося сокращения Индийской и Евразийской литосферных плит. Эта модель объясняет разнообразие горного рельефа и высокую сейсмическую активность в регионе. Одним из самых ярких её проявлений стало Алтайское землетрясение 2003 года с магнитудой $M=7.3$, и интенсивностью $I=9$ баллов.

Данные современных сейсмических сетей представляют информацию о сильных землетрясениях в некоторых регионах только за последние сто лет. В Горном Алтае такая сеть была развернута в 1960-х годах. Для достоверной оценки сейсмической опасности и комплексной оценки сейсмического режима этого недостаточно. Проектировщики и строители ответственных объектов запрашивают от сейсмологов данные о сильной сейсмической активности за последние 100 тыс. лет. При решении этой задачи ученые используют современные методы палеосейсмологии, исторической сейсмологии и археосейсмологии. Сильные землетрясения с $M=5-6$ в большинстве случаев оставляют после себя сейсмогенные деформации рельефа и архитектурных сооружений, которые достаточно хорошо идентифицируются специалистами палеосейсмологии. Изучение этих деформаций предоставляет уникальный материал для долговременной и полноценной оценки сейсмической опасности.

Были исследованы морфоструктуры и палеосейсмичность Горного Алтая. Установлено, что одним из основных сейсмогенизирующих структур в позднем плейстоцене и голоцене являются предгорные разломы взбросо-надвиговой, сдвиговой и сбросовой динамики, форберги. Сейсмическая активность прошлого вдоль предгорных разломов выражена как единичными, так и систематичными сейсмоуступами. Кроме легко идентифицируемой вертикальной компоненты подвижек по разломам выявлены и значительные горизонтальные подвижки, зачастую кратно превышающие вертикальные.

ОЦЕНКА СЕЙСМИЧНОСТИ В ЗОНЕ ГРАНИЦ ОХОТОМОРСКОЙ ПЛИТЫ В РАЙОНЕ ЯПОНСКИХ ОСТРОВОВ

Ступина Т. А.¹, Бушенкова Н. А.²

^{1,2} – *Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Россия; e-mail: StupinaTA@ipgg.sbras.ru*

Структурный анализ пространственного распределения атрибутов сейсмических событий и графиков повторяемости в динамике позволяют делать ретро или перспективную оценку сейсмичности исследуемого региона. В представленной работе проведен атрибутивный анализ сейсмических данных из бюллетеней Японского Метеорологического Агентства (<https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/bulletin/>) за период с 1998 года по 2022 год, включающий как сильные, так и слабые события. Подчеркнуты положительные стороны и недостатки формата данных, находящихся в открытом доступе, а также их существенный объем, позволяющий делать статистически значимые выводы о распределении сейсмических атрибутов, как в пространстве, так и по времени. Сформированная структура библиотеки атрибутов позволила осуществлять быструю сортировку событий с заданными параметрам, строить для них трехмерное распределение через проекции на заданные профили, графики повторяемости, изменение энергии в динамике, распределение оценок фиктивных скоростей. Например, особенности трехмерного распределения гипоцентров землетрясений, зафиксированных не менее чем на 10 станциях (более 2 млн. событий), позволили выделить границу, перпендикулярную оси субдукции в области южной оконечности о. Хоккайдо [1]. Существенная вариация оценок отношения фиктивных скоростей продольных и поперечных волн, как среднее по всем станциям на событие, позволило сделать предварительный вывод о наличии скоростных аномалий в данной области [2].

Работа выполнена при поддержке ФНИ FWZZ-2022-0017.

1. Бушенкова Н.А., Ступина Т.А. Особенности границ Охотоморской плиты в районе Японских островов и Камчатки. Тезисы V Всероссийской научной конференции с международным участием «Геодинамические процессы и природные катастрофы», Южно-Сахалинск, Россия, 2024. 19 с.

2. Садовский М.А. Геофизика и Физика Взрыва. Избранные труды. М.: Наука, 2004. 440 с.

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМАЦИИ ТОПОГРАФИИ МОРСКОГО ДНА НА ЭВОЛЮЦИЮ ЗОНЫ СТАБИЛЬНОСТИ ПОДДОННЫХ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ

Суетнова Е. И.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: elena_suetnova@mail.ru

Газовые гидраты обоснованно рассматриваются как потенциальный источник углеводородов в будущем. Но локализация скоплений газовых гидратов в земной коре зависит не только от наличия в ней газосодержащего флюида, но и наличия термобарических условий стабильности газовых гидратов. Процессы, протекающие в океанической коре, как тектонические, так и климатические потенциально влияют на распределение температуры как минимум в приповерхностных зонах коры, так и на возможное изменение давления насыщающего флюида. В докладе будут приведены возможные примеры и разбор влияния геологических процессов деформирующих топографию морского дна на изменение расположения локализации зоны термобарической стабильности газовых гидратов. Будут приведены некоторые количественные оценки (по результатам моделирования) скоростей и глубин изменений зон стабильности при процессах слайдинга и ледового выпахивания в морском дне северных морей.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВО ВРЕМЕНИ СНЯТИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В СЕЙСМОАКТИВНЫХ РЕГИОНАХ (НА ПРИМЕРЕ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ И О. САХАЛИН)

Сычев В. Н.¹, Богомолов Л. М.², Сычева Н. А.³

^{1,2} – *Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия;
e-mail: koitash@mail.ru*

³ – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

Проведен анализ изменения сброшенных напряжений во времени в период форшоковой активности сильных землетрясений для двух сейсмоактивных регионов с различной геодинамической обстановкой: Северный Тянь-Шань и Южные Курильские острова. В качестве исходных данных использованы ранее составленные каталоги динамических параметров (ДП) землетрясений в этих регионах с большим числом событий. Для Северного Тянь-Шаня каталог ДП очагов содержит 183 записи для землетрясений с магнитудами 2.6–6.0, а в случае Южных Курил – 264 записи. Значения сброшенных напряжений анализируются по всей выборке и для форшоковых периодов – 500 дней перед наиболее сильными землетрясениями. Для обоих регионов выделено по 12 таких значимых событий с магнитудами $M > 5$ для Северного Тянь-Шаня и $M \geq 6.5$ для Южных Курил. Определены медианные средние значения сброшенных напряжений в 500-дневные периоды. Проведено сравнение изменения сброшенных напряжений во времени с изменениями значений b -value (модуль углового коэффициента графика повторяемости землетрясений) за одни и те же периоды наблюдений. Для расчетов b -value в случае Северного Тянь-Шаня использовался каталог сейсмологической сети KNET (1994–2021 гг., более 10 тысяч событий), а в случае Южных Курил – каталог ISC (International Seismological Center) (1964–2000 гг.). В обоих случаях расчет величины b -value выполняется для скользящего интервала 500 дней, со сдвигом 1 день. По результатам расчетов для обоих изучаемых регионов отчетливо проявился хорошо известный эффект увеличения параметра b -value перед сильными землетрясениями. Установлено, что такое возрастание b -value сопровождается уменьшением усредненной величины снятия напряжений. Полученные результаты показали, что проведение мониторинга сброшенных напряжений во времени может быть использовано для выявления нестационарности сейсмического режима. Предложен вариант пополнения банка данных сброшенных напряжений при использовании мировых каталогов землетрясений.

НАПРЯЖЕННОЕ-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ АЛТАЕ-САЯНСКОЙ ГОРНОЙ ОБЛАСТИ

Сычева Н. А.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: ivtran@mail.ru

Методом сейсмотектонической деформации (СТД) исследована территория Алтае-Саянской области. Расчет СТД выполнен на основе подходов, предложенных в работах Ю. В. Ризниченко и С. Л. Юнга. Исследования направленности СТД основаны на данных о фокальных механизмах очагов землетрясений (584 события) произошедших с 1963 по 2021 гг. Для построения карты СТД использована классификация режимов СТД. По картам СТД определено направление осей укорочения, которое меняется с запада на восток от северо-западного до северо-восточного. Для исследуемой территории характерно разнообразие деформационных обстановок: сжатие, транспрессия, горизонтальный сдвиг, транстенсия, растяжение и др. На основе усредненных тензоров деформации рассчитаны и построены распределения коэффициента Лоде – Надаи; угла обобщенно-плоской деформации; вертикальной компоненты. На исследуемой территории выделяются зоны, где проявляются различные режимы деформации - простого сжатия, преобладания простого сжатия, сдвиг, преобладание простого растяжения и простое растяжение. В зависимости от режима деформации на исследуемой территории отмечается как воздымание, так и опускание земной коры.

СРАВНЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ОЦЕНОК ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ АЛТАЕ-САЯНСКОЙ ГОРНОЙ ОБЛАСТИ ПОЛУЧЕННЫХ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ СТО И МКА

Сычева Н. А.¹Ребецкий Ю. Л.²

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: nelya@ifz.ru

В работе представлены результаты сравнения параметров деформации земной коры, рассчитанной по сейсмическим данным на основе двух методов: сеймотектонические деформации (СТО) и метод катакластического анализа разрывных нарушений (МКА). Расчеты выполнены на основе анализа данных о фокальных механизмах очагов землетрясений (584 события), которые произошли на территории Алтае-Саянской горной области (АСО) с 1963 по 2021 гг. с $M > 2$. Сравнение проведено по четырем характеристикам усредненных тензоров приращений сеймотектонических деформаций: направление осей укорочения, коэффициент Лодэ – Надаи, геодинамический режим (режим СТО) и вертикальная компонента (ZZ). Рассматривались две области АСО: Горный Алтай; восточная часть АСО – хр. Академика Обручева, южная часть Восточных Саян и Южное Прибайкалье. Оба метода однозначно отражают деформационные процессы, протекающие на исследуемой территории. Разный подход в формировании анализируемой выборки отражается на величине площади, для которой возможно вычислить параметры деформации: МКА позволяет получать данные для более значимой территории, чем это возможно при использовании метода СТО.

ПРОЯВЛЕНИЕ УСЛОВИЙ МЕРИДИОНАЛЬНОГО СЖАТИЯ В РАЗНОВОЗРАСТНЫХ ОРОГЕНАХ ЕВРАЗИИ

Тверитинова Т. Ю.

*МГУ имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия; Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН,
г. Москва, Россия; e-mail: tvertat@yandex.ru*

Главным полем напряжений на новейшем этапе в различных регионах Евразии является субмеридиональное сжатие, сопровождающееся вертикальным или латеральным широтным растяжением. Это поле напряжений фиксируется практически повсеместно, независимо от ориентировки орогенов и возраста главной складчатости. В обстановке меридионального латерального сжатия формировались широтные структуры сжатия (сдвиги и взбросо-надвиговые структуры), меридиональные структуры растяжения (сбросо-раздвиги), правосдвиговые структуры северо-западного простиранья и левосдвиговые - северо-восточного. Выраженность этого поля напряжений зависит от распределения зон повышенной дислоцированности и разделяемых ими относительно стабильных блоков, величины эрозионно-денудационного среза, преимущественного формационного состава структур. Кинематика различно-ориентированных структур главного парагенезиса приводит к проявлению дополнительных полей напряжений, которые мы, вслед за Л. М. Расцветаевым, называем кинематогенными.

ГЛОБАЛЬНОЕ ПОТЕПЛЕНИЕ КАК ПРИЧИНА АКТИВИЗАЦИИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Тетельмин В. В.

Институт экологии РУДН, г. Москва, Россия; e-mail: v-tetelmin@rambler.ru

Анализ катастрофических стихийных бедствий в мире фиксирует их неуклонный рост и корреляцию с усиливающимся глобальным потеплением. Предлагается алгоритм аналитического расчета глобального потепления, позволяющий рассчитывать частоту повторяемости метеорологических и геофизических природных стихийных бедствий.

Эффект глобального потепления от действия антропогенных выбросов ПГ является отложенным во времени. Например, если бы человечество в 2020 г. при современной концентрации ПГ $K = 182 \text{ ppm-eq}$ добилось углеродной нейтральности, то потепление продолжалось бы ещё 160 лет до достижения равновесной температуры $T_{pp} = 3.4^\circ\text{C}$. Расчеты показывают, что в лучшем случае при самом интенсивном темпе декарбонизации мир будет идти по траектории повышения к 2270 г. глобальной температуры на 5°C .

За период 1900–2020 гг. климатическая система (КС) Земли накопила примерно $Q_{KC} = 215 \cdot 10^{15} \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ парниковой тепловой энергии, а энергия всех отмеченных за этот период землетрясений составила примерно $\Sigma E = 7.8 \cdot 10^{12} \text{ кВт}\cdot\text{ч}$. Отношение $\Sigma E / Q_{KC} = 3.6 \cdot 10^{-5}$ свидетельствует о несопоставимости сейсмической энергии и тепловой энергии, накопленной за один и тот же период времени. Делается вывод о том, что землетрясения и другие проявления эндогенной активности Земли не могут быть причиной глобального потепления.

С 1975 г. глобальное потепление происходит с темпом около $0.18^\circ\text{C}/10 \text{ лет}$. Растущая глобальная температура задает граничное условие первого рода и формирует нисходящий тепловой поток вглубь земной коры, снижает естественный температурный градиент, чем затрудняет разгрузку идущего из земных недр геотермального потока. Нагревание горных пород формирует в толще земной коры термоупругие напряжения, которые в условиях всестороннего сжатия способны вывести горный массив из состояния равновесия, оживить существующие разломы и сочленения тектонических плит и инициировать сейсмическое событие. Подобный механизм лежит в основе наблюдаемого усиления сейсмической активности на планете Земля.

Земная кора регулярно сбрасывает получаемую парниковую тепловую энергию через учащающиеся сейсмические события. С 1970 по 2020 гг. частота отмеченных страховыми компаниями геофизических стихийных бедствий (ГФ-бедствий) увеличилась с 30 до 56 в год. По мере увеличения накопленной климатической системой Земли тепловой энергии частота повторяемости ГФ-бедствий будет увеличиваться до 75 ед./год в 2050 г. и до $N = 95 \text{ ед./год}$ в 2100 г.

УПРУГИЕ ИЗГИБЫ ТОЛСТЫХ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ

Трубицын А. П.¹, Трубицын В. П.²

^{1,2} – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: atrub@yandex.ru*

В настоящее время изгибные деформации океанических плит и изгибные колебания сооружений при землетрясениях рассчитываются на основе уравнений изгиба тонких плит Кирхгофа–Лява. При учете поправок для изгиба толстых плит в технике используются уравнения Тимошенко, Рейснера и Миндлина. Однако эти уравнения учитывают не все поправки, что в течение почти ста лет отмечается в статьях и учебниках. Авторами получены новые более точные уравнения 2D-изгиба толстых плит, учитывающие все поправки второго приближения. Уточняя уравнения Тимошенко, Рейснера и Миндлина, новые уравнения оказываются не сложнее их, так как только изменяют численный коэффициент при производной и добавляют универсальный аддитивный член для напряжений. По сравнению с общими точными уравнениями упругости решение полученных уравнений находится намного проще, имея при этом высокую точность даже для очень толстых плит. На этой основе получены аналитические решения для деформаций упругого изгиба океанических плит вблизи зон субдукции. Потенциальным приложением теории также могут быть изгибные колебания зданий и сооружений (моделируемых как вертикальные плиты) при землетрясениях. В зоне сильных землетрясений строятся малоэтажные здания, для расчета колебаний которых нужны уравнения изгиба толстых плит.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРЕ-, КО- И ПОСТСЕЙСМИЧЕСКИХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ СДВИГА И СЖАТИЯ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ

Трубицын В. П.¹, Трубицын А.П.²

^{1,2} – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: vtrubi@yandex.ru*

На трансформных границах благодаря трению скольжения соприкасающиеся литосферные плиты находятся в напряженно-деформированном состоянии горизонтального сдвига, а в зонах субдукции — вертикального изгиба и сжатия. При локальном зацеплении плит на границе трение скольжения сменяется на трение покоя. Поэтому в окрестности зацепления плит на временах порядка сотни лет нарастают пресейсмические напряжения и деформации. Когда сдвиговое напряжение станет больше максимального трения покоя, происходит срыв зацепления. Возникает землетрясение, после которого плиты постепенно возвращаются в состояние напряжения, соответствующее трению скольжения. При этом сначала за секунды избыточное напряжение зацепления частично снимается в виде упругих косейсмических смещений, а затем к ним в течение десятков лет постепенно добавляются постсейсмические смещения, обусловленные вязкой релаксацией астеносферы. Эти три этапа изменения распределений напряжений и деформаций плит перекрываются. Но для простоты каждый из этих этапов сначала можно рассматривать по отдельности для одиночного землетрясения. Медленные пре- и постсейсмические деформации рассчитываются на модели упругой плиты на вязком основании, а быстрые косейсмические деформации — на модели упругой плиты на упругом основании. Решения уравнений, описывающих эти этапы, представлены в простом аналитическом виде. Они показывают эволюцию распределений горизонтальных смещений в плитах, вызванных землетрясениями. Результаты модели сравниваются с данными измерений смещений поверхности плит при землетрясениях для трансформной границы Сан-Андреас и зоны субдукции Японского желоба.

РОЛЬ НОВЕЙШИХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ СТРУКТУР ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ ОСОБЕННОСТЕЙ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ АРТЕЗИАНСКИХ БАССЕЙНОВ (НА ПРИМЕРЕ ОТДЕЛЬНЫХ ТЕРРИТОРИЙ УЗБЕКИСТАНА)

Турсунметов Р. А.¹, Хасанбаев Х. Ф.²

^{1,2} – ГУ «Институт ГИДРОИНГЕО», г. Ташкент, Республика Узбекистан;
e-mail: tursunmetov45@mail.ru

В аридной зоне основные ресурсы подземных вод сосредоточены в проницаемых отложениях неогенового и четвертичного периодов, поведение которых изучается в рамках новейших тектонических структур. В настоящее время разработаны научно-методологические основы изучения новейших тектонических структур. К ним можно отнести работы В. И. Макарова (1977 г.), Н. И. Николаева (1988 г.), П. Н. Николаева (1992 г.), Н. И. Корчугановой, Н. П. Костенко, И. Н. Межеловского (2001 г.), М. А. Гончарова, В. Г. Талицкого, Н. С. Фроловой (2005 г.).

Необходимо отметить, что методика изучения новейших тектонических структур применительно к задачам гидрогеологических исследований не разработана в достаточной степени для практики. Привлечение новейших тектонических структур требует разработки применения специфического метода выявления указанных структур в условиях артезианских бассейнов. Таким образом, методику изучения новейших структур в целом можно рассматривать в двух аспектах, то есть на основе структурного парагенеза геологических структур [Гончаров, 2005] и объемного картирования геологической среды в целях изучения непрерывного изменения геологической среды с привлечением геологических, геофизических, а также методов дистанционного зондирования Земли.

Структурный парагенез геологических структур четко проявляется в эволюции тектонических структур [Турсунметов, 2012] — палеозойских, альпийских и неотектонических периодов, характеризующая целостность и определенное содержание геологического строения артезианского бассейна. В целом устанавливается иерархия тектонических процессов в артезианском бассейне. Палеозойские структуры характеризуются грабенообразной структурой ступенчатого характера в виде сброса, образующиеся за счёт региональных глубинных разломов при развитии горизонтального растяжения. В продолжение этих разломов в верхней части разреза наблюдаем развитие тектонических нарушений, образующихся благодаря процессам горизонтального сдвига в вертикальной плоскости. На последнем этапе тектонического развития территорий наблюдается процесс субмеридионального сжатия, благодаря чему артезианский бассейн представляет собой несколько блоков и в межблоковом пространстве развитие горизонтального сдвига в горизонтальной плоскости образует поперечные тектонические нарушения. В результате наблюдаем образования флексурных зон. Геологическая среда изучается в рамках модели блоково-зональной слоистой среды с неоднородностями, в результате чего устанавливаются тектонические нарушения различной природы и характер изменения проницаемых отложений с глубиной [Турсунметов, 1980]. Исходя из модели, были привлечены результаты геоморфологических, электроразведочных и методов дистанционного зондирования Земли. Предлагаемый подход апробировался в пределах отдельных артезианских бассейнов и межгорных впадин. Различия в развитии тектонических нарушений во многом определяют гидрогеологические условия, связанные с формированием подземных вод.

К ВОПРОСУ О ГЕОДИНАМИКЕ ЛОКАЛЬНЫХ РУДОНОСНЫХ ПЛОЩАДЕЙ (НА ПРИМЕРЕ ДАУГЫЗТАУСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ КЫЗЫЛКУМСКОЙ ЗОЛОТОРУДНОЙ ПРОВИНЦИИ)

Умматов Н. Ф.¹, Турапов М. К.²

^{1,2} – ГУ «Институт минеральных ресурсов», г. Ташкент, Республика Узбекистан; e-mail: nurali.ummатов@mail.ru

Работа посвящена решению проблемы геодинамической обстановки локальных площадей проявления эндогенного золотого оруденения Кызылкумского золоторудной провинции. В качестве примера рассматривается Даугызтауское рудное поле на юге регионе. Показано, что для повышения эффективности геологоразведочных работ, достоверности прогнозно-металлогенических исследований необходимо расшифровать геодинамику площади проявления оруденения в этапе рудообразования. Обоснована разработанная новая методика изучения геодинамики рудообразования. Таким образом, геодинамическая обстановка Даугызтауского рудного поля периода рудообразования определялась воздействием внешних региональных сил и его структурно-тектоническим строением, где основными тектоническими элементами являются разломы и блоки, которые под воздействием внешних сил активизировались, создавая структурные позиции благоприятных формированию золоторудных месторождений и рудопроявлений.

ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ОСНОВНОЙ ПЛОСКОСТИ РАЗРЫВА НА ДИАГРАММАХ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО ДАННЫМ ПОЛЕВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Умурзаков Р. А.

Ташкентский государственный технический университет имени И. Каримова, г. Ташкент, Республика Узбекистан; e-mail: umrah@mail.ru

В докладе приводятся результаты исследований геолого-структурными и тектонофизическими методами остаточных деформаций эпицентральных (и плейстосейстовых) областей отдельных сильных землетрясений Суусамырского 19.08.1992 $M=7.3$; Ташкентского 26.04.1966 $M=5.3$; Таваксайского 06.12.1977 $M=5.0$; Папского 17.02.1984 $M=5.7$ и др. Основной целью исследований была реконструкция осей главных напряжений эпицентральной области по геолого-структурным данным для сопоставления с механизмами очагов по инструментальным данным. В результате оперативных исследований вслед за Газлийским (1984 г.), Папским (1984 г.) Суусамырским (1992 г.) землетрясениями была установлена возможность оперативного определения механизмов очагов землетрясений по кинематическим признакам первичных остаточных сейсмодислокаций. Картирование многочисленных вторичных сейсмодислокаций, позволяет определить эпицентр и направление основного удара-толчка. Вместе с тем, обследование признаков кинематических данных по зеркалам скольжений трещин и статистические замеры трещин в массивах горных пород позволили получить данные об ориентации осей главных напряжений позднекайнозойской активизации. Был проведён сравнительный анализ материалов реконструкций по остаточным сейсмодислокациям, кинематическим признакам скольжений по трещинам и данных механизмов очагов по инструментальным данным. Установлено, что инструментальные определения механизмов очагов в большинстве случаев совпадают с реальными механизмами очагов землетрясений, полученных по остаточным сейсмодислокациям. Однако имеются и не совпадения. Вместе с тем, в большинстве случаев механизм очага по остаточным сейсмодислокациям, а также и по инструментальным данным, в точности соответствует полю напряжений, полученному для района исследований по геолого-структурным данным. Последнее свидетельствует об унаследованном характере сейсмогенерирующих деформационных процессов от позднекайнозойского, новейшего поля тектонических напряжений. Сделан важный вывод, что при определениях основной плоскости разрыва в механизмах очагов землетрясений по данным записей сейсмограмм недостаточно качественное отождествление с известной зоной разлома, а необходимо тектонофизическое обследование эпицентральной зоны и обоснование основного разрыва по данным тектонофизического анализа.

ВЫЯВЛЕНИЕ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СТРУКТУР В РАЙОНЕ ТУЮКАНСКОГО РУДНОГО УЗЛА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В КОНТЕКСТЕ ПРОГНОЗА РУДООБРАЗУЮЩИХ СИСТЕМ

**Устинов С. А.¹, Чепчугов А. М.², Петров В. А.³, Яровая Е. В.⁴, Свечеревский А. Д.⁵,
Томаровская М. А.⁶**

*1, 2, 3, 4, 5, 6 – Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
г. Москва, Россия; e-mail: stevesa@mail.ru*

Для района Туюканского рудного узла (площадь листа ГГК О-49-ХІІ) на основе различных подходов, в том числе авторских, к выделению линеаментов с использованием цифровой модели рельефа, включая её разнонаправленную фильтрацию, и применением геоинформационных технологий проведён комплексный линеаментный анализ, включающий структурно-геоморфологический, пространственно-геометрический и тектонофизический методы.

Сравнение ориентировок региональных разрывных нарушений древнего заложения и неотектонических разрывных структур позволило установить их унаследованность. В связи с этим морфологические особенности рельефа могут быть использованы для достоверной реконструкции каркаса как неотектонических, так и древних разрывных нарушений, участвовавших в процессе миграции рудоносных флюидов, восстановления кинематики перемещений в зонах основных разломов, как на этапе заложения, так и в результате последующих активизаций. Установлено, что решающее значение в локализации оруденения играют зоны динамического влияния северо-восточных и северо-западных разломов.

На основе модели развития вторичных структур в зоне скола П.Л. Хэнкока и установленных разрывных нарушений реконструированы параметры регионального поля напряжений-деформаций, а также кинематика основных типов разрывов. Магистральные разломы северо-восточной ориентировки, субпараллельные границе Сибирской платформы и Саяно-Байкальской складчатой области, характеризуются как правые сдвиги при ориентировке оси сжатия 90°. Разломы северо-западной ориентировки являются левыми сдвигами. Системы разломов субмеридионального простирания представляют взбросы. Структуры отрыва субпараллельны оси максимального сжатия и ориентированы субширотно.

Расчет тенденции к сдвигу с учетом установленной ориентировки главных осей регионального поля напряжений-деформаций позволил выявить наиболее гидравлически активные сегменты разрывных структур, которые характеризуются преимущественно северо-восточной и северо-западной ориентировками. С точки зрения прогноза размещения полезных ископаемых, дальнейшие работы необходимо сосредоточить на тектонофизическом анализе мегатрещин, развитых преимущественно в зонах динамического влияния установленных наиболее гидравлически активных (структурно проницаемых) разломов – северо-восточного и северо-западного простирания. Данные надрегиональные и региональные структуры могли выступать в качестве рудоподводящих, а структуры более высокого ранга – рудоконтролирующих.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00218, <https://rscf.ru/project/24-27-00218/>.

ВОПРОСЫ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ, ЯВЛЕНИЙ И ФАКТОРОВ НА СОВРЕМЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ В РАЙОНЕ И НА ПЛОЩАДКЕ РАЗМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

Фихиева Л. М.¹, Лободенко И. Ю.²

^{1,2} – *НТЦ по ядерной и радиационной безопасности, г. Москва, Россия; e-mail: fihieva@secnrs.ru*

В России, согласно требованиям Федеральных норм и правил в области использования атомной энергии и рекомендациям МАГАТЭ, учитывается влияние внешних природных и техногенных процессов явлений и факторов на объекты использования атомной энергии (ОИАЭ). В районе и на площадке размещения ОИАЭ с начала сооружения ОИАЭ, при его эксплуатации и выводе из эксплуатации (закрытии) выполняется мониторинг параметров процессов, явлений и факторов природного воздействия, а также периодический контроль параметров внешних воздействий техногенного происхождения, в том числе выполняются сейсмологический мониторинг, геодинамический мониторинг горизонтальных и вертикальных современных движений земной коры (СДЗК). Мониторинг осуществляется с учетом данных глобальных и единых государственных систем мониторинга, действующих на территории Российской Федерации. В докладе рассматривается взаимное влияние контролируемых мониторингом параметров внешних воздействий. В докладе отмечается, что работа полигона типа Семипалатинского приводит к снижению уровня сейсмичности территории. Этот техногенный процесс назван А.В. Николаевым «сейсмическим массажем Земли». А.В. Николаевым было показано, что процесс сейсмического массажа Земли может быть также вызван активными боевыми действиями. В настоящее время воздействие сейсмического массажа Земли на значения горизонтальных и вертикальных компонент СДЗК не исследован как на уровне мониторинга в районе и на площадке ОИАЭ, так и на уровне единых государственных систем мониторинга, действующих на территории Российской Федерации. Тем временем сложение (в формате сложения двух векторов) относительного крена площадки размещения ОИАЭ, образованного воздействием современных вертикальных движений земной коры (СВДЗК), и относительного крена зданий и сооружений ОИАЭ, образованного вследствие неравномерной осадки и движений грунтов основания, позволяет определить фактический крен зданий и сооружений ОИАЭ. Таким образом, оценка влияния воздействия сейсмического массажа Земли на значение и направление градиента скорости СВДЗК на площадке размещения ОИАЭ является важным условием обоснования безопасности ОИАЭ. Кроме того, наблюдаемое в настоящее время глобальное потепление климата в виде изменения температуры может вызвать ряд опасных процессов и явлений в верхних геосферах Земли, включая изменения в горных породах, накопление деформаций, тектонических смещений и разрывов, СДЗК, тектонический крипп. Таким образом, в настоящее время актуальным является комплексная оценка результатов всех видов мониторинга в районе и на площадке ОИАЭ: метеорологического, гидрологического, гидрогеологического, сейсмологического, геодинамического мониторинга СДЗК, геотехнического мониторинга грунтов основания, включая наблюдения за кренами и осадками зданий и сооружений ОИАЭ.

ПРОБЛЕМА АНАЛОГОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ХРУПКИХ ДЕФОРМАЦИЙ В ИНТРУЗИВНЫХ МАССИВАХ СДВИГОВЫХ ЗОН НА ПРИМЕРЕ БАИМСКОЙ РУДНОЙ ЗОНЫ

Фролова Н. С.¹, Арешин Н. А.²

^{1,2} – МГУ имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия; e-mail: n.s.frolova@mail.ru

Известно, что с интрузиями нередко генетически и пространственно связаны гидротермальные месторождения рудных полезных ископаемых, при этом структурный фактор является определяющим в их локализации. Для понимания закономерностей формирования разрывного структурного парагенеза в интрузивных телах полезно привлекать аналоговое моделирование, однако задача выбора материала для этого до сих пор не решена.

Баимская рудная зона (БРЗ) представляет собой широкую зону сдвига с несколькими извилистыми пересекающимися разломами и рядом малоглубинных интрузий, обусловившими медно-порфировую (более раннюю) и золото-серебряную (более позднюю) минерализацию. С помощью аналогового моделирования мы стремились получить трещины разных систем, которые можно сравнить с разрывами, установленными геологическими методами, а также локализацией месторождений и рудопроявлений. За рубежом для интрузивных тел применяют силикон (разрывов в нем не образуется), а для вмещающих пород – сухой песок. Для моделирования даек применяют желатин. Наши эксперименты с использованием желатина и агар-агара для интрузий и влажной каолиновой глины для матрикса показали, что в «интрузивных телах» образовались лишь редкие трещины отрыва. Если тела были выполнены из сухого песка, то формировались нечетко выраженные R-сколы. Наилучшие результаты показали модели, в которых интрузивные тела имитировались влажной фаянсовой глиной. Если влажность глины не сильно отличалась от таковой матрикса, при сдвигании формировались R-сколы внутри тела, R и R'-сколы в матриксе. Аналогом R-сколов в БРЗ являются меридиональные разрывы, к которым приурочены, в основном, месторождения и рудопроявления меди. Также в пределах и ближайших окрестностях интрузивных массивов отчетливо выделяется система разрывов СВ простирания с преимущественно золото-серебряной минерализацией. В моделях аналогичную систему удалось получить при смачивании поверхности тел из влажной глины глицерином, что привело к снижению предела прочности и формированию трещин отрыва.

Мы считаем, что упомянутые системы разрывов формировались в единой обстановке правого сдвига, а смена разрывов скалывания разрывами растяжения связана с изменением деформационных свойств пород интрузий при их остывании. Наши эксперименты показали, также, что влажная глина подходит для моделирования хрупких деформаций в интрузивных телах, надо лишь правильно подбирать деформационные свойства этого материала.

О ВОССТАНОВЛЕНИИ СМЕЩЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ, КОГДА ОНИ УЖЕ ПРОИЗОШЛИ В МОМЕНТ ЕЕ СОЗДАНИЯ. ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

**Чанышев А. И.¹, Чещин Д. О.², Плохих В. В.³, Городилов Л. В.⁴, Рублев Д. Е.⁵,
Кордубайло А. О.⁶**

*1, 2, 3, 4, 5, 6 – Институт горного дела имени Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия; e-mail:
a.i.chanyshhev@gmail.com*

Для отыскания смещений на контуре горной выработки, когда они уже произошли в момент ее создания, предлагается использовать метод щелевой разгрузки. Наряду с выработкой рассматривается ее макет. Это означает то, что в массиве горных пород сначала определяется место расположения макета выработки, выполняемой в масштабе по отношению к исходной выработке. Далее в этом месте создается разгрузочная щель, повторяющая в масштабе контур исходной выработки. В процессе образования щели измеряются нормальные и тангенциальные смещения границы, как с внутренней части щели, так и с наружной. Смещения во внутренней части щели характеризуют напряженно – деформированное состояние массива пород до образования выработки. Смещения в наружной части определяют напряженно – деформированное состояние массива пород, вызванное образованием выработки в нагруженном положении массива пород. Полные смещения контура выработки представляются как сумма двух смещений – смещений за счет создания выработки и смещений (с обратным знаком для керна), вызванных нагружением массива пород до образования выработки.

Предложенная идея проверяется экспериментально с применением резиноподобных материалов при растяжении и материала типа оргстекло при сжатии.

Полученные значения смещений применялись для оценки НДС образцов из указанных материалов, размеров образцов, величин прикладываемых нагрузок путем решения соответствующей задачи Коши.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда, проект № 22-17-00188.

О КОСОМ ВНЕДРЕНИИ ЖЕСТКОГО КЛИНА В ПЕРВОНАЧАЛЬНО АНИЗОТРОПНУЮ СРЕДУ

Чанышев А. И.¹, Белоусова О. Е.², Лукьяшко О. А.³

^{1,2,3} – *Институт горного дела имени Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия; e-mail: a.i.chanyшев@gmail.com*

Исследуются первоначально анизотропные среды характеризуемые 21 константой упругости. Закон Гука в тензорном базисе определяет линейное преобразование, при котором координаты тензоров напряжений и деформаций в выбранном базисе связываются посредством симметрической матрицы, составленной из констант упругости. Матрицы путем ортогональных преобразований переводятся к диагональному виду. Помимо собственных чисел определяются собственные векторы (или собственные тензоры). Вводится гипотеза о том, что собственные векторы упругости остаются собственными в пластичности и при разрушении. На этой основе строятся уравнения пластичности для первоначально анизотропных сред. Для случая плоской деформации определяются характеристики системы дифференциальных уравнений, соотношения на них. В качестве примера решается задача о косом внедрении жесткого клина в первоначально анизотропную среду. Устанавливаются силы сопротивления среды с двух сторон клина, которые необходимо преодолеть для движения в ту или другую стороны. Определяется положение точки приложения силы, исходя из равенства главного момента сил. Приводятся иллюстративные решения.

Работа выполнена в рамках проекта НИР (номер государственной регистрации 124020700085-5).

БУГУЛЬДЕЙСКО-ЧЕРНОРУДСКИЙ ГРАБЕН – КАЙНОЗОЙСКАЯ СТРУКТУРА В ЗОНЕ КРАЕВОГО ШВА СИБИРСКОГО КРАТОНА

Черемных А. В.¹, Бобров А. А.², Декабрёв И. К.³, Черемных А. С.⁴, Гридин Г. А.⁵, Павлов Д. В.⁶, Юрьев А. А.⁷

^{1, 2, 3, 4, 7} – *Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия; e-mail: cherem@crust.irk.ru*

^{5, 6} – *Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, г. Москва, Россия*

Бугульдейско-Чернорудский грабен – одна из наиболее молодых структур Байкальской рифтовой зоны. Его возраст оценивается как позднеплейстоценовый. Опущенный блок грабена ограничен Приморским и Тырганским разломами. В структурном плане грабен относится к Северобайкальской впадине и является юго-западным окончанием последней. Он образовался в пределах сформированной ранее зоны взаимодействия Сибирского кратона и причленившегося к нему в раннем палеозое Ольхонского террейна. Для данного сегмента краевого шва кратона характерны взбросовые и сдвиговые смещения крыльев в палеозойское время, а также сдвиговые и сбросовые их перемещения на раннем и позднем этапах кайнозойского орогенеза соответственно. Грабен, общая длина которого более 200 км, хорошо обнажен на протяжении ~70 км от пос. Бугульдейка на юго-западе до д. Сарма на северо-востоке, где с целью изучения специфики активизации разрывных структур в зоне влияния этой узкой и протяженной позднекайнозойской дислокации были выполнены геоморфологические, геологические и геофизические исследования. Комплексирование методов позволило откартировать разрывные нарушения, активные на неотектоническом этапе развития региона (линеamentный анализ), установить их элементы залегания и кинематический тип (геолого-структурные исследования), а также оценить ширину их зон и специфику внутренней структуры грабена (электротомография).

В остаточных деформациях рельефа – линеаментах, отчетливо выражены два тектонических этапа: сдвиго- и сбросообразования. Сбросовый этап, связан с кайнозойским рифтогенезом, что подтверждается хорошей выраженностью в рельефе разломов-линеamentов. Разрывы более ранних этапов при этом либо претерпели активизацию и в настоящее время являются хорошо проявленными в рельефе элементами сбросовых зон, либо, преимущественно за пределами разломных зон, остались «пассивными», частично затухавшими экзогенными процессами.

Геолого-структурный материал, собранный в пределах изучаемой структуры и её окрестностей, свидетельствует о том, что основные разломы являются долгоживущими, претерпевшими неоднократные активизации под действием различно ориентированных внешних сил.

Электротомография показала, что сместители Приморского и Тырганского сбросов на геоэлектрических разрезах характеризуются крутым падением и отделяют области высоких и низких электрических сопротивлений, а внутренняя структура грабена является разломно-блоковой. Кроме того, под склоном Приморского хребта, на некоторых разрезах наблюдаются грабенообразные структуры меньшего размера, вероятно образованные за счет смещения по основному (синтетическому) сбросу и по сбросам с встречным падением (антитетическим).

О ПОРОЖДЕНИИ ЭЛЕКТРОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С КРУТЫМИ ФРОНТАМИ (SES) ТРЕЩИНАМИ ПРИ ВАРИАЦИИ ЛОКАЛЬНОЙ НДС

Чирков Е. Б.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: ye_chirkov@list.ru

На основе анализа результатов ряда экспериментов выдвигается гипотеза о порождении SES трещинами при вариациях локальной НДС. В пользу данной гипотезы говорят факты повсеместного наблюдения (Они, Мукулан, Тенерифе, Камчатка) SES в разной, в том числе в не сейсмоопасной геолого-геофизической обстановке, небольшое количество источников SES в каждом случае, стабильность их положения и характеристик во времени и пространстве, хорошее описание источников с помощью модели точечного диполя, излучение SES обеими концами трещин, наличие вариации амплитуды и числа импульсов в связи с вариацией локальной НДС. На основе анализа излучения ряда источников получены общие законы трех-параметровых распределений для амплитуды импульса, интервала перед импульсом и общий трех-параметровый закон распределения для целого набора сочетания этих характеристик для ряда источников SES. Последнее свидетельствует о наличии связи между амплитудой и интервалом перед импульсом для каждого источника. В предположении сходства вариаций НДС для двух концов трещины в силу их малых размеров предложен новый информационный параметр, одновременно оценивающий амплитуду и интервал между импульсами. Распределение значений параметра хорошо описывается двух-параметровым распределением Коши, что подтверждает наличие связи между амплитудой и интервалом перед импульсом. Кроме того, показана возможность предсказания значений амплитуды нового информационного параметра по величине интервала на основе общей формулы с двумя константами специфичными для каждого источника с точностью не хуже 95% для всех источников.

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ АМПЛИТУДНЫХ ЭЛЕКТРОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С КРУТЫМИ ФРОНТАМИ (SES), ПРЕДПОЛОЖИТЕЛЬНО ОТРАЖАЮЩИХ ИЗМЕНЕНИЕ ПРИРОДЫ ИХ ИСТОЧНИКОВ

Чирков Е. Б.¹, Лементуева Р. А.²

^{1,2} – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: ye_chirkov@list.ru*

На основе анализа результатов экспериментов на 12 независимых трещинах отмечается резкое увеличение степени схождения амплитуд излучения двух концов трещины SES для высокоамплитудных импульсов, вероятность появления которых, согласно закону распределения, меньше 1%. Степень схождения излучений двух концов трещины является для небольших трещин свидетельством того, что оба конца трещины испытывают общую вариацию НДС. Сопоставление различий разных информационных параметров для двух концов трещины позволяет оценить какие информационные параметры наиболее сходно отражают общую вариацию НДС для двух концов трещин. Поскольку анализируется 12 трещин за два с половиной года с частотой опроса 1 Гц и оцениваются средние характеристики, то полученные оценки достаточно представительны. Степень схождения амплитуд высокоамплитудных SES для двух концов трещины превышает для этих импульсов степень схождения по предложенному параметру интенсивности, несмотря на то, что для 99% импульсов всех трещин ситуация прямо противоположная. Более того для 12 трещин средние, максимальные и минимальные различия излучений двух концов трещин по амплитуде становятся меньше соответствующих значений по частоте импульсов, которая является характеристикой наиболее сходной для двух концов трещины для 99% импульсов. На основе анализа временного хода и различий распределений всех информационных параметров для высокоамплитудных и всех остальных импульсов выдвинута гипотеза о смене характера микротрещин в вершинах трещин с микротрещин отрыва на микротрещины сдвига.

ОБ ЭТАПЕ ДЕФОРМАЦИИ СКЛАДЧАТОЙ СТРУКТУРЫ БОЛЬШОГО КAVKAZA В ЗОНЕ ГЛАВНОГО KAVKAZСКОГО РАЗЛОМА В РАЙОНЕ Г. ШАХДАГ, ЗАНИМАЮЩЕМ МЕСТО МЕЖДУ СКЛАДЧАТОСТЬЮ И РОСТОМ ГОРНОГО СООРУЖЕНИЯ

Яковлев Ф. Л.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: yak@ifz.ru

При восстановлении сбалансированной структуры осадочного чехла Юго-Восточного Кавказа была обнаружена ее важная особенность в профиле, проходящем к югу от г. Шалбуздаг. Структура части профиля в южной Тфанской зоне, длиной 7.5 км, сформирована терригенным флишем средней юры. Северная часть профиля, в Шахдагской зоне, представлена также терригенными породами средней юры, но уже не флишевыми. Разделены эти две зоны Главным Кавказским разломом (ГКР, он же – Ахтычайский разлом), имеющим сложную историю развития. В Шахдагской зоне перед поздней юрой возникла складчатость, а далее здесь отлагались мелководные карбонатные толщи небольшой (1 – 1.5 км) мощности. В Тфанской зоне на этом этапе накопилось 6-8 км карбонатного флиша от верхней юры до эоцена. Плоскость ГКР падает на юг, по ней флиш аалена кинематически надвинут на песчаники более древнего тоара. Структура самой Тфанской зоны нарушена четырьмя разломами, падающими на юг и имеющими характер сбросов. В доскладчатой структуре эти разломы показали надвигание северных блоков на юг, что указывает на два этапа движений. Предполагается, что в олигоцене (?) при сокращении и формировании альпийской складчатости Тфанская зона продолжала погружаться относительно Шахдагской зоны; это объясняет надвигание блоков с севера на юг. Современная структура «ложных сбросов» сформирована позже пластическими деформациями простого сдвигания в наклонных зонах, падающих на юг. Это сдвигание изменило ориентацию надвигов с крутого северного падения на южное, без изменения характера смещений толщ. Общая структура Тфанской зоны, сбалансированная в объеме всего чехла, указывает на поднятие и размыв верхней части чехла с амплитудой около 20 км, поэтому возникнуть такие зоны могли только в конце этапа складкообразования и размыва. Это означает, что наклонные зоны теоретически могли смещать древние абразионные поверхности, ныне не сохранившиеся. Для объяснения этой структуры была разработана кинематическая модель такого ее деформирования в наклонных зонах, в которую входили параметры: а) толщины модели (мощности наклонной зоны), б) ее наклона относительно горизонта и в) угла сдвигания. В Тфанской зоне в результате применения модели были выделены две такие зоны, имеющие параметры, на юге и на севере: (а) 1.2 и 0.3 км, (б) 40° и 20°, (в) 54° и 60°. Это обеспечивало смещение гипотетической абразионной поверхности в верхней точке каждой зоны с амплитудами поднятия и перемещения на север: 1.1 км и 1.3 км в южной зоне и 0.3 и 0.8 в северной. Таким образом, найден и охарактеризован ранее неизвестный промежуточный этап деформаций структуры Большого Кавказа, занимающий в истории его развития место между альпийской складчатостью и неотектоническим поднятием наиболее древней поверхности выравнивания.

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГРАММЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ 3D ИЗОБРАЖЕНИЯ МАЛЫХ ФОРМ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ СТРУКТУРНОЙ ГЕОЛОГИИ (НА ПРИМЕРЕ СКЛАДОВ ТАЛАССКОГО ХРЕБТА ТЯНЬ-ШАНЯ)

Яковлев Ф. Л.¹, Гордеев Н. А.², Коваль А. А.³

^{1,2,3} – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-mail: yak@ifz.ru*

Последние годы бурно развивается направление использования БПЛА, в том числе – в научных исследованиях. Параллельно с развитием аппаратуры стали появляться и новые программные решения. В фотограмметрии [Краснопевцев, 2008] сейчас активно используется программа AGISOFT METASHAPE, с помощью которой оператор БПЛА или фотограф имеют возможность быстрого построения объемных поверхностей различных объектов. При добавлении фотографий в среду обработки фотографий строится своеобразная стереопара, в которой на каждом соседнем снимке определяются похожие и уникальные точки; при расчёте их положения как раз и создается объём фигур. Далее оператор программной среды уже работает с готовой моделью и рассчитывает необходимые геометрические параметры природного объекта. Заметим, что получаемые объемные модели представляют собой принципиально новый способ фиксации природных структур и их описания. В рекогносцировочном полевом маршруте 2022 года нами были сделаны необходимые фотографии складок, а полученные их объемные модели были использованы для определения величины укорочения этих складок. Основой метода, использованного для определения укорочения, является кинематическая модель деформирования компетентного слоя в сочетании со слоем некомпетентным, в которой форма слоя на крыле изменяется инкрементами механизмов изгиба (поворота) и сплющивания, а в замке – только сплющивания [Яковлев, 1980; 2015]. Серия расчетов с разными сочетаниями механизмов позволила построить основную номограмму, в которой по осям откладываются: а) угол наклона слоя на крыле складки и б) отношение мощности слоя на крыле к его мощности в замке. Пространство номограммы занимают изолинии величины укорочения складки и доли сочетания механизмов. Таким образом, для определения величины укорочения необходимо измерить мощность слоя в двух местах складки (замок и крыло), а также измерить ориентацию слоя относительно положения осевой поверхности складки. Визуализация AGISOFT METASHAPE позволяет легко совмещать ось проекции изображения с шарниром складки, проходящим через нужный слой. Это обеспечивает наименее искаженное изображение взаимной ориентации осевой плоскости складки и слоя на крыле, а также наиболее точные изображения самого слоя в замке и на крыле, что позволяет сделать нужные измерения углов и расстояний. В рамках технологического эксперимента нами изучены несколько складок в двух обнажениях во флишевой чаткарагайской свите (нижний кембрий) в профиле Карабура Таласского хребта. В каждой складке измерения проводились для 2-5 слоев, что обеспечивало до 5 – 10 значений величины укорочения в этих структурах. В целом разброс составил от 55-60% до 90%. Максимальные значения 90% ($K=L_0/L_1=10$) найдены в складке, угол между крыльями в которой составлял около 10-12°. Значительный разброс величин укорочения объясняется неоднородным распределением деформаций. Ранее найденное общее большое укорочение всей структуры Таласского хребта [Yakovlev et al., 2023], составившее $K = 4.55$ (120.2 км / 26.4 км), указанными результатами косвенно подтверждается. По этим данным была построена сбалансированная модель земной коры всей структуры [Яковлев, Фролова, 2022].

Сборник аннотаций докладов участников
Шестой Всероссийской тектонофизической конференции,
приуроченной к 300-летию Российской академии наук
«ТЕКТОНОФИЗИКА И АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ НАУК О ЗЕМЛЕ»

ИФЗ РАН, 7-12 октября 2024 г.

Ответственный редактор:
доктор физ.-мат. наук Ю. Л. Ребецкий

Редактор:
кандидат геол.-мин. наук Е. А. Мануилова

Москва, 2024