

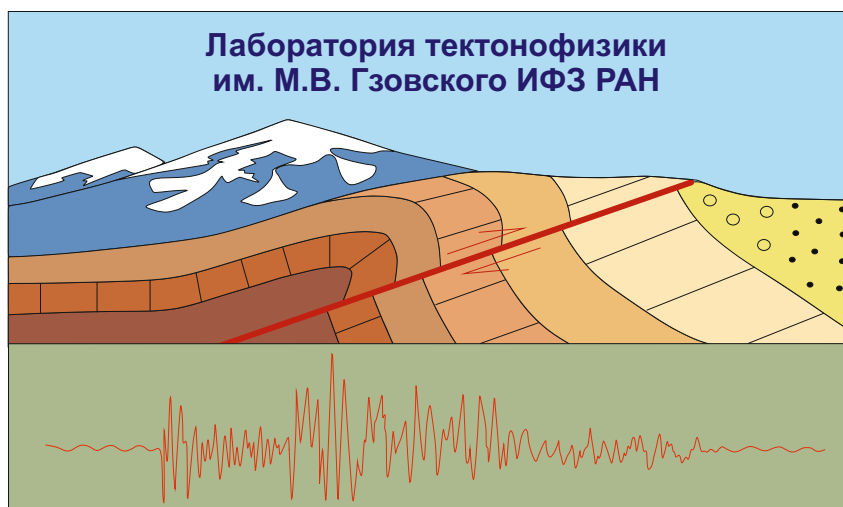
**ОТДЕЛЕНИЕ НАУК О ЗЕМЛЕ РАН
НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРОБЛЕМАМ
ТЕКТониКИ И ГЕОДИНАМИКИ**

**ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ
ИМ. О. Ю. ШМИДТА РАН**



**ЛАБОРАТОРИЯ
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ
ПРОБЛЕМ ТЕКТОНОФИЗИКИ ИФЗ РАН**

**СБОРНИК АННОТАЦИЙ ДОКЛАДОВ
Девятой Всероссийской молодежной
тектонифизической школы-семинара
СОВРЕМЕННАЯ ТЕКТОНОФИЗИКА
МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ**



**20 - 24 октября 2025 года
г. Москва**

СОДЕРЖАНИЕ

АННОТАЦИИ ЛЕКЦИЙ-ДОКЛАДОВ ВЕДУЩИХ РОССИЙСКИХ УЧЕНЫХ	4
Ю. Л. Ребецкий Особенности эволюции развития субдукционных зон, как фактор формирования рудных месторождений гидротермального генезиса.....	4
Г. Н. Гогоненков Сдвиговая тектоника и нефтегазовые месторождения Западной Сибири	5
М. Г. Леонов Фрагментированность земной коры: формы, размерность, структурно-вещественное выражение (в развитие идей академика М. В. Садовского).....	6
С. Ю. Соколов Трансформация представлений о глубинных мантийных неоднородностях и нестандартные схемы активных тектонических элементов в океане по геолого-геофизическим данным	7
Ю. П. Стефанов Численное моделирование процессов деформации и разрушения в геосреде	8
В. Г. Трифонов, Д. М. Бачманов Соотношение активных разломов и офиолитов в Альпийско-Гималайском поясе	9
А. В. Маринин Тектонофизические аспекты развития Большого Кавказа	10
А. Г. Гоев, К. А. Докукина Строение литосферы и древняя тектоника кольского региона по новым сейсмологическим данным	11
А. В. Горбатиков, А. А. Цуканов, М. Ю. Степанова, Н. В. Андреева, Н. Г. Кошевой, Ю. В. Харазова Практика применения метода микросейсмического зондирования в задачах тектоники и геологоразведки	12
Н. В. Дубиня Изучение напряженного состояния верхних слоев земной коры для решения прикладных задач освоения и разработки нефтегазовых месторождений.....	13
АННОТАЦИИ ДОКЛАДОВ МОЛОДЫ УЧЕНЫХ.....	14
О. А. Артемов, С. Ю. Соколов Связь неотектонических деформаций разломной зоны Чарли Гиббс на поверхности дна с глубинными мантийными неоднородностями	14
И. А. Бабенко, И. В. Таловина, Н. С. Крикун, Д. Е. Ушаков Изучение тектонических деформаций в контексте эволюции пегматитообразования на территории оазиса Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида	15
Е. Е. Барабошкин, О. А. Волкова, Д. М. Орлов, Д. А. Коротеев Искусственный интеллект и компьютерное зрение для описания трещиноватости горных пород	16
А. В. Батов, Н. А. Гордеев, Т. В. Гудкова Применение SimSGM для реконструкции полей напряжений в районе Cerberus Fossae на Марсе	17
В. А. Боголюбский, С. Ю. Соколов, С. В. Харченко Структурные стили фундамента Северной Атлантики по данным спектральных характеристик гравитационного поля	18
В. А. Боголюбский В.А. Структурообразование в районах взаимодействия спрединговых хребтов и внеосевых мантийных плюмов	19
И. В. Бондарь Обзор тектонофизических исследований Крымского региона	20
И. А. Воронов, Н. В. Дубиня Применение геомеханического моделирования для прогнозирования распределения естественных трещин в пластах нефтегазового месторождения, расположенного в Западной Сибири	21
О. В. Гайдаленок, А. И. Сысолин, С. А. Пулинец, А. Сеснед, С. Тосо, М. Браво Мультидисциплинарная платформа для прогнозирования землетрясений.....	22

А. Гараванд, Ю. Л. Ребецкий Численное моделирование механизма образования отрывной трещиноватости в осадочных бассейнах	23
А. Гараванд Анализ разрушения толстостенного цилиндра с учётом неупругого поведения материала	24
Н. А. Гордеев Аэротектонофизика, опыт картирования трещиноватости	25
Н. А. Гордеев, Л. А. Сим Кинематика разрывных нарушений на месторождении открытого типа на основе данных о поясах трещиноватости в сравнении с результатами других методов тектонофизики	26
В. А. Дегтярев, П. А. Каменев О геодинамических процессах на о. Сахалин в кайнозойе	27
В. А. Дегтярев, П. А. Каменев Взаимосвязь распределения сейсмичности Западного Сахалина и особенностей геологического строения	28
С. О. Джанабилова, А. Г. Шералхан Современные деформации и сейсмическая активность Северного Тянь-Шаня	29
А. И. Докучаева Численное моделирование зоны сдвига по разлому при современном движении земной коры	30
С. К. Досайбекова, Ж. Б. Досымбекова, Ж. К. Жунусова Изучение механизмов очагов землетрясений в регионе Заилийского Алатау на основе данных за 2000–2024 гг.	31
М. Н. Евсеев Упругие и пластичные напряжения и деформации в утолщающихся океанических плитах	32
Г. С. Индаков, П. А. Казначеев, З.-Ю. Я. Майбук, А. В. Пономарев, М. А. Матвеев, Ю. А. Морозов, Н. Б. Подымова Кластеризация импульсов акустической эмиссии в экспериментах по нагреву образцов горных пород	33
П. А. Казначеев, Д. В. Краюшкин, З.-Ю. Я. Майбук, А. В. Пономарев, А. В. Патонин, Н. А. Закржевская, И. Н. Мигунов, В. В. Кох Некоторые результаты исследования смещений на лабораторной модели разлома	34
А. Н. Корбутяк, Н. С. Фролова, И. А. Пантелеев, А. Ю. Изюмова Применение метода активной термографии для оценки потенциальной флюидопроницаемости сдвиговых зон в аналоговых моделях: первый опыт	35
А. О. Королева Инструментальные возможности ОКО-3 АБ-100МЗ для исследования структурных деформаций четвертичных и коренных отложений (на примере северного побережья Онежского озера)	36
Н. С. Крикун, Н. А. Гордеев, Д. Е. Ушаков, И. А. Бабенко Изучение тектонических деформаций, морфологии и кинематики разломов оазиса Холмы Ларсеманн (Восточная Антарктида) по результатам 70-й РАЭ	37
А. А. Крылов Основные эндогенные геопасности в российском секторе Северного Ледовитого океана	38
М. А. Кузнецов, Н. А. Гордеев, Н. Н. Дунаев Напряженно-деформированное состояние массивов пород острова Южная Георгия (Антарктика)	39
Д. А. Кулешов Определение параметров вековой вариации геомагнитного поля при проведении геомагнитных наблюдений на Байкальском и Алтайском геодинамических полигонах за 1997–2024 гг.	40
Д. Ю. Куприн, Н. В. Дубиня Статистическая обработка результатов автоматической интерпретации микроимиджеров	41

Д. В. Ложкин, И. А. Пантелеев, В. Ляховский Ориентация зоны локализованной поврежденности в горных породах в условиях традиционного и истинного трёхосного сжатия	42
Е. А. Мануилова Взаимосвязь флювиальных форм рельефа с современными тектоническими структурами Таманского полуострова	43
Е. А. Мануилова, Т. Ю. Тверитинова Тектонические напряжения северо-восточного фланга Байкальской рифтовой зоны. Результаты, полученные в ходе экспедиции РГО по маршруту Байкало-Амурской магистрали.....	44
А. П. Молокова, А. А. Скоркина Магнитудная классификация землетрясений Ключевской группы вулканов.....	45
А. Б. Молчанов, Н. А. Гордеев SimSGM: автоматический поиск участков локального сжатия и растяжения.....	46
А. Б. Молчанов, Н. А. Гордеев Опыт применения методов ДЗЗ в ПО SimSGM	47
Д. С. Мягков Моделирование затухания поля напряжений в области развития локализованного сдвига	48
Д. С. Мягков Моделирование нагружения земной коры в области развития магматических тел различных типов. Напряжённо-деформированное состояние коры Центрально-Азиатского складчатого пояса и Кольского региона.....	49
М. А. Новиков, А. А. Крылов Уточнение сейсмического режима в районе дельты р. Лены для оценки сейсмической опасности	50
И. И. Нугманов Кластеризация участков коры, опасных для сильнейших землетрясений	51
Б. Н. Пашичев Структурный фактор при прогнозе опасности внезапных выбросов угля и газа.....	52
А. Ю. Полец Напряженное состояние Тихоокеанского побережья Камчатки.....	53
С. Н. Понасенко Оценка расстановки пунктов временной сейсмологической сети по изменению чувствительности и максимального азимутального пробела	54
С. А. Рябова Отклик напряженности электрического поля, сопутствующий землетрясению в округе Сикайн 28 марта 2025 г., по данным обсерватории «Михнево».....	55
А. А. Сенцов, А. О. Агibalов Применение морфометрических и тектонофизических методов для задач сейсмотектоники	56
А. С. Силевич Линеаментный анализ по цифровой модели рельефа для выявления природных каналов миграции метана.....	57
А. А. Стрельников Параметризация палео и исторических землетрясений района Тору-Айгыр, Северного Тянь-Шаня.....	58
А. А. Стрельников Параметризация палео и исторических землетрясений Таласского Ала-Тоо, Западного Тянь-Шаня	59
Я. В. Таран, И. М. Алешин, К. И. Холодков, Ф. В. Передерин Геофизические исследования Раахе-Ладожской зоны в Северном Приладожье	60
В. А. Тимошина Взаимосвязь неотектонических напряжений и опасных геологических процессов на территории Черноморского побережья Кавказа	61
Н. С. Щевьёва Исследование сейсмотектонических деформаций, связанных с серией сильнейших землетрясений начала XXI в. в Чили	62

**ОСОБЕННОСТИ ЭВОЛЮЦИИ РАЗВИТИЯ СУБДУКЦИОННЫХ ЗОН, КАК ФАКТОР
ФОРМИРОВАНИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО
ГЕНЕЗИСА**

Ю. Л. Ребецкий

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

Генезис месторождений благородных металлов (золото, серебро, платина, никель, медь, редкоземельные и др.) связан с активными континентальными окраинами, где происходили процессы магматизма и вулканизма. Порфировые рудные системы, содержащие рудные залежи благородных металлов, образуются из высокотемпературных магмато-гидротермальных флюидов и называются порфировыми из-за порфировидной структуры минерализованных интрузий. Образование магмы происходит в астеносферном клине над обезвоживающейся субдукционной плитой. В коре образуются плутонические породы, состав которых варьируется от диоритового до гранодиоритового. Эти магмы выходят на поверхность, образуя целый ряд вулканических продуктов - от базальтовых до андезитовых, дацитовых и риолитовых. Напряженное состояние коры в момент магмогенерации играет важную роль в типе последующего магматизма и металлогенеза.

Поскольку формирование рудных месторождений гидротермального генезиса требует наличия разломов дилатансионного типа, образующих коллектора (растяжение со сдвигом), возникает дилемма в объяснении их формирования в зонах субдукции с режимом горизонтального сжатия. **В этой связи, говорят о нейтральном по отношению к сжимающему напряжению режиме (?).**

В докладе будет дано объяснения генезиса формирования локальных зон горизонтального растяжения в зонах субдукции и механизм возникновения рудных месторождений гидротермального типа.

СДВИГОВАЯ ТЕКТНИКА И НЕФТЕГАЗОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Г. Н. Гогоненков

*Всероссийский научно-исследовательский геологоразведочный нефтяной институт, г. Москва,
Россия; gogonenkov.g@vnigni.ru*

За последние годы, благодаря активному применению сейсморазведки 3D на значительной территории Западно-Сибирской низменности – одного из крупнейших нефтегазоносных бассейнов мира – выявлено широкое развитие новейшей системы горизонтальных сдвигов – сколов в толще дислоцированного фундамента, вызывающих парагенез структурных и флюидодинамических аномалий в структуре юрско-мелового осадочного чехла, вмещающего множество крупнейших месторождений нефти и газа. Сдвиговые дислокации пространственно увязаны с системой Колтогорско-Уренгойских грабен-рифтов древнего заложения, пересекающих Западно-Сибирскую низменность в квазимеридиональном направлении.

В настоящем докладе будет показана география распределения и масштабы проявления сдвиговой тектоники фундамента, представлены их количественные характеристики, определены причины, по которым это явление не было обнаружено ранее. Будут рассмотрены особенности проявления структур горизонтального сдвига в осадочном чехле, на экспериментальных данных продемонстрирована связь сдвиговых нарушений с пластическими деформациями осадочного чехла, доказано их существенное влияние на характеристики месторождений нефти и газа, находящихся в зоне развития сдвиговых структур, обсуждены возможные тектонические причины формирования мощной системы сдвиговых дислокаций в центральной части Западно-Сибирского осадочного бассейна.

**ФРАГМЕНТИРОВАННОСТЬ ЗЕМНОЙ КОРЫ: ФОРМЫ, РАЗМЕРНОСТЬ,
СТРУКТУРНО-ВЕЩЕСТВЕННОЕ ВЫРАЖЕНИЕ (В РАЗВИТИЕ ИДЕЙ АКАДЕМИКА
М. В. САДОВСКОГО)**

М. Г. Леонов

Геологический институт РАН, г. Москва, Россия; mgleonov@yandex.ru

Изучение явления фрагментирования, делимости горных пород имеет большое значение для понимания сущности сейсмического процесса, решения задач горнопромышленной индустрии, выявления параметров и механизмов разломно-трещинной тектоники.

Принципиально значимый вклад в разработку этого направления был внесен академиком Михаилом Александровичем Садовским. Проблема делимости как правило рассматривается в контексте разломно-трещинной тектоники. Тем не менее, делимость определяется не только линейными структурами, но и существованием трехмерных геологических провинций с характерным только для этих провинций структурно-вещественным наполнением, которое отражает фактор времени, т. е. четвертое измерение индивидуализированных геологических тел. Делимость земной коры и литосферы в таком аспекте практически не изучена.

В докладе на основе рассмотрения конкретных геологических провинций континентальной и океанической литосферы показано существование подобных объектов, а также принципиальная важность их выделения в структуре и эволюции Земли.

ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ГЛУБИННЫХ МАНТИЙНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЯХ И НЕСТАНДАРТНЫЕ СХЕМЫ АКТИВНЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ОКЕАНЕ ПО ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

С. Ю. Соколов

Геологический институт РАН, г. Москва, Россия; sysokolov@yandex.ru

Главным источником информации о строении и латеральных неоднородностях мантии является сейсмотомография. Этот метод развивается последние полвека при постоянном совершенствовании моделей объемного распределения сейсмических скоростей и повышения детальности. Эволюция алгоритмов обработки сейсмологических данных сопровождалась эволюцией геодинамических моделей и представлений о процессах в мантии Земли. При этом была сформирована система механизмов, которыми глубинные процессы воздействуют на активные тектонические элементы на поверхности литосферы в океане. Наблюдаемые по геолого-геофизическим данным морских съемок структуры являются следствием, этого воздействия. Съемки показывают факты, для которых интерпретация с помощью упрощенных моделей океанического тектогенеза (или их отдельных элементов) применима с большими допущениями. Такими фактами являются:

- одновременное существование конвективных ячеек и суперплюмов;
- неглубокие (до 120 км) корни вдоль осевых аномалий СОХ;
- признаки суперпозиции ветвей суперплюмов;
- несимметричные вариации скоростей спрединга и их локальные инверсии;
- смещения эпицентров землетрясений относительно оси СОХ;
- дублирующие СОХ гравитационные аномалии;
- расслоенность литосферы в области дивергентных границ;
- распад единой вдоль осевой томографической аномалии на серию вертикальных микроплюмов;
- сопоставимость микроплюмов и значений АМП с геохимическими типами базальтов;
- импульсный характер магматизма горячих точек без треков движения и его распределение;
- пространственная корреляция деформаций осадочного чехла и глубинных мантийных неоднородностей;
- признаки вертикальных движений блоков коры, связанных с серпентинизацией.

Перечисленные особенности тектонических элементов на поверхности обосновывают модификации основных положений гипотезы (геодинамической теории) тектоники плит, сделанные в работах В. Е. Хаина.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ В ГЕОСРЕДЕ

Ю. П. Стефанов

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Россия;
yu_st@mail.ru*

Численное моделирование представляет собой воспроизведение физического процесса путем решения системы уравнений механики в рамках сделанных предположений. С помощью моделирования могут быть уточнены гипотезы об условиях и механизмах протекания процесса, изучено влияние различных факторов на развитие деформации, а также получено объяснение наблюдаемых явлений.

В лекции основное внимание уделено математической модели для описания процессов деформации и разрушения горных пород. Дается описание модели, основанной на комбинированной предельной поверхности и неассоциированном законе течения, которая позволяет описывать процесс необратимой деформации с учетом дилатансии и компаксии. Описана процедура решения системы уравнений.

Рассмотрен ряд примеров численного моделирования развития деформации в геологической среде. Показано, что конфигурация разломной зоны в верхних слоях земной коры в значительной мере зависит как от свойств пород и порового давления, так и от соотношения главных осей напряжений. Приведены примеры простой оценки формирования областей необратимой деформации и полос локализованного сдвига.

СООТНОШЕНИЕ АКТИВНЫХ РАЗЛОМОВ И ОФИОЛИТОВ В АЛЬПИЙСКО-ГИМАЛАЙСКОМ ПОЯСЕ

В. Г. Трифонов¹, Д. М. Бачманов¹

1 – Геологический институт РАН, г. Москва, Россия; trifonov@ginras.ru

В данном сообщении представлены результаты исследования роли офиолитов в локализации активных разломов и интенсивности перемещений по ним в азиатской части Альпийско-Гималайского пояса от Восточной Турции до Юго-Восточной Азии. Для решения этой задачи мы суммировали данные о распределении и залегании офиолитов, расположении и кинематике активных разломов, и пространственных соотношениях между ними. Большинство офиолитовых зон группируются в три пояса: Палеотетиса, Мезотетиса (северной ветви Неотетиса, по В.Е. Хаину) и собственно Неотетиса. Кроме них, принимались во внимание позднепалеозойские офиолитовые зоны региона.

В областях, где зоны субдукции имели пологий наклон, располагаясь на значительном протяжении в пределах земной коры и самых верхов мантии, современная земная кора насыщена офиолитами. Они частично выведены на земную поверхность последующими поднятием и эрозией. В противоположность этому, крутые зоны субдукции преобразовались в более узкие офиолитовые зоны, разделенные блоками континентальной коры. Среди крупных активных разломов региона преобладают сдвиги. Многие крупные активные разломы проходят вдоль обнажающихся на поверхности офиолитов. В ряде случаев, активные разломы или их сегменты, пересекающие или ограничивающие офиолитовые тела, показывают большие амплитуды и скорости движений, чем продолжающие их разломы и сегменты разломов, нарушающие блоки континентальной коры или ее чехла. При этом активные разломы, как правило, не наследуют конкретные тектонические нарушения эпохи формирования офиолитов.

Приуроченность активных разломов к офиолитовым зонам и их высокая подвижность связаны с повышенной деформационной способностью офиолитов, обусловленной в значительной мере присутствием в них серпентинитов и продуктов их преобразований. Повышенная текучесть офиолитов и, соответственно, подвижность активных разломов, расположенных в офиолитовом субстрате, связана с наличием водных флюидов, участвующих в процессе серпентинизации перидотитов, и молекулярного водорода, выделяющегося при распаде фаялитовой компоненты оливина.

Проанализированы сейсмотектонические проявления сильнейших землетрясений Восточной Турции, Эрзинджанского 1939 г., Пазарджикского и Эльбистанского 2023 г., а также Мандалайского 2025 г. в Мьянме. Четыре указанных землетрясения расположены в офиолитовом субстрате над повышенной кровлей низкоскоростной (горячей и разуплотненной) мантии, уменьшающей мощность литосферы и прочность коры. При небольшой глубине очаговой области (не глубже 20 км) все четыре землетрясения характеризуются повышенной протяженностью зон сейсморазрывов, являющихся выходами очага на земную поверхность. Их протяженность выходит за рамки статистических соотношений магнитуды и длины зоны сейсморазрывов для коровых сдвиговых землетрясений. Эту особенность сильных землетрясений в офиолитовом субстрате следует учитывать при оценке сейсмической опасности.

ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ БОЛЬШОГО КАВКАЗА

А. В. Маринин

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; marinin@ifz.ru

Большой Кавказ активно изучался многими поколениями геологов, тем не менее в последние десятилетия получены фактические данные заставляющие нас с новых позиций оценить влияние движущих сил тектонической эволюции региона. На основе мониторинга сейсмологических данных при помощи разработанного в лаборатории тектонофизики ИФЗ РАН метода катакластического анализа разрывных нарушений, картину распределения действующих в настоящий момент тектонических напряжений возможно рассчитать практически в режиме реального времени. На основе анализа геологических индикаторов деформаций/напряжений, собранных нами на Западном и Центральном Кавказе, получена информация о характере напряженно-деформированного состояния земной коры на более длительном интервале новейшей тектонической истории. На базе структурных наблюдений систематизированы данные по кинематической характеристике разрывных систем, а также выделены наиболее проявленные направления, присущие Кавказскому региону в целом и для его отдельных тектонических зон. Последние опубликованные данные ГНСС наблюдений показывают наличие современных сдвиговых перемещений в регионе, которые закономерно продолжают развитие тектонических структур.

В докладе рассматривается связь полученного комплекса новых данных с основными этапами эволюции Большого Кавказа для которых имеются отличающиеся варианты интерпретации. Например, существенно различаются оценки времени поднятия и объема размытия орогена. Широким диапазоном значений отличается и размер его горизонтального сокращения. При тектонофизическом анализе с учетом напряженно-деформированного состояния земной коры региона возможен отбор вариантов интерпретации, которые наиболее приближены к наблюдаемым в природной среде процессам.

СТРОЕНИЕ ЛИТОСФЕРЫ И ДРЕВНЯЯ ТЕКТОНИКА КОЛЬСКОГО РЕГИОНА ПО НОВЫМ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ

А. Г. Гоев^{1,2}, К. А. Докукина³

¹ – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; andr.goev@gmail.com*

² – *Институт динамики геосфер им. ак. М. А. Садовского РАН, Москва, Россия*

³ – *Геологический институт РАН, Москва, Россия*

Несмотря на то, что Кольский регион активно исследовался сейсмическими методами и является одним из наиболее изученных в РФ, отсутствие развитой площадной сейсмической сети существенно осложняло и сдерживало применение современных методов сейсмологии, таких как шумовая томография и метод функций приемника. Начиная с 2020 года стартовал эксперимент по расширению сейсмической сети за счет установки 4 новых широкополосных сейсмостанций в западной части исследуемой территории. Таким образом, совместно со станциями международных служб, а также Кольского филиала ФИЦ ЕГС РАН, в регионе функционирует сеть из 14 широкополосных станций, установленных в различных тектонических элементах Кольского региона.

В результате применения метода функций приемника, для каждой из станций широкополосной сейсмической сети были получены скоростные модели земной коры и верхней мантии до глубин около 300 км. По данным 5 сейсмостанций, установленных в западной части изученного региона, коро-мантийный переход имеет градиентное строение, представленное постепенным увеличением скоростей V_s (в интервале глубин 33–60 км). На остальных станциях граница Мохо резкая и фиксируется на глубинах от 35 до 44 км. По новым данным мантия имеет гетерогенное строение. Одни станции фиксируют слой пониженных скоростей MLD (mid-lithosphere discontinuity) в диапазонах глубин 70–140 км. Другие станции демонстрируют его полное отсутствие или понижение скорости на неожиданно больших глубинах ~ 210 км. Несколько станций продемонстрировали две области понижения скоростей на глубинах 90–160 и 170–250 км.

По-видимому, такое сложное гетерогенное строение литосферы, является следами взаимодействия архейской литосферы и мантийного палеопротерозойского плюма. На коровых уровнях событие выражено проявлениями широкого ареала ранне-палеопротерозойского магматизма основного состава LIP (large igneous province). Ареал щелочного ультраосновного магматизма на юго-востоке частично пересекается с изученной территории, поэтому в районе станций АРА, LVZ можно предполагать интерференцию палеопротерозойских и палеозойских процессов.

ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ ТЕКТониКИ И ГЕОЛОГОРАЗВЕДКИ

**А. В. Горбати́ков¹, А. А. Цуканов¹, М. Ю. Степанова¹, Н. В. Андреева¹, Н. Г. Кошевой¹,
Ю. В. Харазова¹**

¹ – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; avgor70@mail.ru*

Метод микросейсмического зондирования (ММЗ) – это дифференциальный амплитудный метод пассивной сейсморазведки. Удобство его применения заключается в том, что измерения выполняются по принципу «отдельной станцией» последовательно в точках профиля. Информативным параметром является степень искажения спектров исходного микросейсмического поля при его рассеянии на скоростных неоднородностях. Фазовая информация не используется. Форма и глубина залегания неоднородности оценивается исходя из пространственного распределения искажений спектра исходного поля, фиксируемого на земной поверхности, и частоты, на которой эти искажения проявляются в максимальной степени. ММЗ позволяет получить разрез в параметрах вариаций скоростей по отношению к региональной скоростной модели. Саму скоростную модель разреза можно при этом не определять.

ММЗ успешно применяется для исследования структуры, свойств и параметров залегания различных объектов в различных геолого-географических условиях, включая решение как научно-исследовательских, так и разведочно-поисковых задач в том числе в комплексе с другими независимыми методами. Примеры приводятся в докладе.

Выяснено в ходе многократных сопоставлений результатов ММЗ и бурения, что наиболее значимыми факторами, влияющими на снижение скоростей сейсмических волн в локальных зонах, являются увеличенная трещиноватость, увеличенная пористость и увеличенная степень измененности горных пород.

Исходя из данной интерпретационной схемы были проведены два этапа исследований глубинного строения в контактных зонах литосферных блоков в сопоставлении с сейсмичностью и регистрируемыми современными движениями на примере Северного склона Большого Кавказа и западной части Терско-Каспийского прогиба. Для представления в рамках единой кинематической модели процесса формирования тектонической структуры горно-складчатого сооружения Кавказа, определяемой напряжениями субгоризонтального сжатия, структуры северного склона Большого Кавказа, Осетинской впадины и Сунженского хребта были объединены двумя глубинными субширотными геофизическими разрезами ММЗ длиной до 100 км. Обнаружены крупные глубинные низкоскоростные аномалии под северным склоном Большого Кавказа и Назрановским поднятием. Сунженский и Терский хребты не имеют подобных аномалий. Их глубинное строение отличается от северного склона Большого Кавказа, а генезис связан с горизонтальным сжатием и складчато-надвиговыми деформациями в осадочном чехле.

ИЗУЧЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕРХНИХ СЛОЕВ ЗЕМНОЙ КОРЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ ОСВОЕНИЯ И РАЗРАБОТКИ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Н. В. Дубиня^{1, 2}

¹ – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; Dubinya.NV@gmail.com*

² – *Московский физико-технический институт, г. Москва, Россия*

В лекции представлен обзор методов изучения напряженного состояния верхних слоев Земной коры с использованием геофизических данных, получаемых в ходе освоения и разработки месторождений полезных ископаемых. К этим методам относятся проведение сейсмических съемок, геофизические исследования скважин и специальные эксперименты на образцах горных пород. Описываются наиболее распространенные на практике методы интерпретации таких данных для оценки напряженного состояния массивов горных пород – анализ вывалообразования, тестов на утечки и гидроразрыва пласта, – а также специальные подходы: изучение сброшенных деформаций, эффекта Кайзера, естественной трещиноватости и анизотропии динамических упругих модулей пород, наведенной сильным различием главных напряжений. В лекции представлены теоретические основы этих методов и продемонстрированы примеры их практической реализации. Отдельное внимание уделено комплексированию различных локальных методов оценки напряжений для реконструкции их полей: описаны три модели построения одномерных профилей напряжений (пороупругая, слоистая и линейная), дано введение в построение двух- и трехмерных полей напряжений в массивах горных пород, принятое в практике геомеханики месторождений углеводородов.

Вторая часть лекции посвящена использованию результатов реконструкции параметров напряженного состояния на месторождениях нефти и газа для решения ряда прикладных задач геомеханики. Рассмотрено использование геомеханических моделей для оптимизации дизайна гидроразрыва пласта, расчета устойчивости ствола скважины, предупреждения пескопроявления, прогноза изменения фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов в ходе разработки, изучения флюидопроводимости естественных сдвиговых трещин и проседания земной поверхности над месторождением. Описаны основные подходы к изучению этих процессов, отдельно рассмотрен вопрос точности построения геомеханической модели и влиянию погрешности в оценке напряжений на успешность решения перечисленных прикладных задач геомеханики. Приведены примеры реализации описываемых подходов и алгоритмов по результатам работ автора на отечественных и зарубежных месторождениях нефти и газа, а также на объектах, обладающих фундаментальной значимостью.

Лекция может быть интересна слушателям, имеющим базовое представление о подходах к изучению напряженного состояния массивов горных пород, а также интересующимся возможностями приложения фундаментальных подходов тектонофизики и геодинамики к решению прикладных задач.

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

О. А. Артемов¹, С. Ю. Соколов¹

¹ – Геологический институт РАН, г. Москва, Россия; oleg.artemov.00@mail.ru

Разломная зона Чарли Гиббс расположена на широте ~52°с.ш. в Северной Атлантике представляет собой сдвоенный трансформный разлом с суммарным смещением сегментов Срединно-Атлантического хребта (САХ) ~350 км. Район исследования нехарактерен для стандартной структуры прихребтовых разломных элементов, он выделяется следующими уникальными геологическими и геодинамическими особенностями:

- Морфология и тектонические элементы;
- Расположение кластеров сейсмических событий вне осей положительных магнитных аномалий рифтов;
- Инверсия преобладания скоростей спрединга с восточного на западное к северу от разлома;
- Конфигурация аномального гравитационного поля в редукции Буге;
- Близость активных источников сноса осадочного материала, ввиду того что структура Чарли Гиббс является естественным коридором для придонных течений Северной Атлантики.

Слабоконсолидированные осадки на подвижном океаническом фундаменте позволяют выделить современные деформации по сейсмоакустическим данным верхней части разреза. В районе трансформной структуры выделяются признаки субмеридионального смещения приразломных уступов, вариативность морфологии кровли базальтового фундамента, неравномерное распределение сейсмичности вдоль разломных трогов. Данные сейсмотомографии отражают неоднородность термального состояния мантии, влияющей на поверхностные структуры. Ключевым фактором этого влияния является Исландский плюм к северу от разломной зоны Чарли Гиббс. Разломная зона играет роль структурного «холодного» барьера, к северу от которого по данным плотностной томографии видны следы субширотного смещения осевой прогретой зоны.

Наиболее полные сведения о разломной зоне Чарли Гиббс были получены в 2020 году в ходе экспедиции ГИН РАН, проходившей на 50-м рейсе НИС «Академик Николай Страхов». В процессе работы использовались методы сейсмоакустического профилирования, многолучевого эхолотирования, донного опробования и магнитометрии. Кроме того, в рамках обработки данных для представляемого доклада были привлечены данные региональных геофизических полей из открытых источников. В рамках рассматриваемого этапа исследования особое внимание уделено анализу неотектонических процессов через картирование поверхностных деформаций осадочного чехла, а также описанию региональных геодинамических процессов и возможного сценария их современного развития. Эти результаты базируются на объемных геофизических данных и полученном в результате сейсмоакустического картирования распределении поверхностных деформаций.

ИЗУЧЕНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ В КОНТЕКСТЕ ЭВОЛЮЦИИ ПЕГМАТИТООБРАЗОВАНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ ОАЗИСА ХОЛМЫ ЛАРСЕМАНН, ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА

И. А. Бабенко¹, И. В. Таловина¹, Н. С. Крикун¹, Д. Е. Ушаков¹

¹ – Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия; babenko_ivan@vk.com

В работе приведены результаты комплексного изучения геологического положения, минералогических, геохимических особенностей и геофизических характеристик различных типов пегматитовых образований, генетически и пространственно связанных с тектоническими деформациями оазиса Холмы Ларсеманн (Восточная Антарктида).

В основе работы использованы материалы и данные, собранные в ходе сезонных геолого-геофизических работ в 70-ю Российскую антарктическую экспедицию (2024–2025 гг.). На исследуемой территории выделяется пять различных типов пегматитов, которые отличаются друг от друга пространственным положением, минеральным составом, геохимическими особенностями и по данным геофизических наблюдений. Все эти образования «залечивают» ослабленные зоны земной коры, сформированные в результате нескольких деформационных событий в раннем палеозое. На основании комплексного изучения и интерпретации минералого-геохимических и геологических данных уточняется возраст деформационных событий и термобарические характеристики начальных и финальных стадий метаморфического события, затронувшего данный регион в раннем палеозое.

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И КОМПЬЮТЕРНОЕ ЗРЕНИЕ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ТРЕЩИНОВАТОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

Е. Е. Барабошкин¹, О. А. Волкова¹, Д. М. Орлов¹, Д. А. Коротеев¹

¹ – Сколтех, г. Москва, Россия; baraboshkin@petroleum.digital

В докладе будет представлен детальный анализ современных технологий, предназначенных для комплексного описания петрографических и геомеханических характеристик горных пород. Особое внимание уделено методам классификации пород по типам, текстурным признакам и другим параметрам, а также их практическому применению в горнодобывающей и нефтегазовой отраслях.

В рамках исследования рассмотрены результаты анализа трещиноватости горных пород, включая такие параметры, как тип трещин, их пространственная ориентация, степень раскрытия и интенсивность развития. Также приведены данные по определению интегральных геомеханических характеристик, таких как индекс качества породы (RQD) и коэффициент крепости (FF), что позволяет оценить устойчивость породных массивов и прогнозировать их поведение в условиях эксплуатации.

Для демонстрации практического применения описанных технологий приведены примеры из нефтегазовой и горнорудной отраслей. Это позволяет подчеркнуть универсальность и эффективность предложенных методов в различных горнотехнических условиях.

ПРИМЕНЕНИЕ SIMSGM ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ В РАЙОНЕ CERBERUS FOSSAE НА МАРСЕ

А. В. Батов¹, Н. А. Гордеев¹, Т. В. Гудкова¹

¹ – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия, batov@ifz.ru*

За четыре года работы сейсмометр миссии InSight зафиксировал множество марсотрясений, значительная часть которых была локализована в районе тектонической структуры Борозды Цербера (Cerberus Fossae). Геометрия, сегментация этой структуры и её связь с источниками сейсмических событий подробно рассмотрены в работе Perrin et al., 2022. Механизмы наиболее крупных марсотрясений представлены в исследовании Brinkman et al., 2021. Напряжённое состояние недр Марса анализировалось в ряде исследований, включая работы Батова, Гудковой, Жаркова, а также Broquet & Andrews-Hanna (2022), где дополнительно обосновано существование активного мантийного плюма под областью Элизий.

В настоящей работе мы применяем программный комплекс SimSGM для тектонофизического анализа спутниковых изображений района Cerberus Fossae. Метод, в частности, позволяет выявлять локальные напряжённо-деформированные области, зоны сжатия и растяжения, что способствует более точной интерпретации механизмов марсотрясений и оценке современных тектонических процессов на Марсе.

СТРУКТУРНЫЕ СТИЛИ ФУНДАМЕНТА СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ ПО ДАННЫМ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ

В. А. Боголюбский^{1,2}, С. Ю. Соколов², С. В. Харченко³

¹ – *Московский Государственный Университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия;
bogolubskiyv@yandex.ru*

² – *Геологический институт РАН, г. Москва, Россия*

³ – *Географический институт РАН, г. Москва, Россия*

К настоящему моменту хорошую изученность структурных стилей имеют лишь осевые части спрединговых хребтов, тогда как для фланговой зоны подобные исследования практически отсутствуют или являются прикладными на границе океан-континент (ГОК) и зачастую направлены на поиск углеводородов. По результатам работы были выявлены трансформанты гравитационного поля, в наибольшей степени отражающих структуры фундамента флангов Срединно-Атлантического хребта (САХ). Для ключевого участка Северной Атлантики был проведён расчет 2-х мерных спектров гравитационного поля и его экспозиции в тестовых районах с преобладанием типичных взаимно ортогональных структурных элементов дна показал, что 2-х мерные спектры анализируемого поля в локальной области, кроме ориентации структур показывают также их амплитуду в исходном поле и их пространственную периодичность, и адекватно описывают структурный стиль фундамента в современных координатах, меняющийся от периферии котловины к срединному хребту. В процессе эволюции формируется фундамент с переменной геометрией, в которой имеет место вращение в плоскости дна на $\sim 10\text{--}15^\circ$ и отклонения из-за наложенных нетипичных структур. Помимо этого, проведена кластеризация по комплексу спектральных характеристик трансформант гравитационного поля. Для анализа спектра использовалась методика С. В. Харченко, в которой предусматривается вычисление ряда характеристик (длина волны, амплитуда, направление и т.д.) для выполнения последующей кластеризации посредством самоорганизующихся карт Кохонена. Применение данной методики имеет преимущество перед классическими методиками кластеризации и другими нейросетями за счёт значимости параметров размера кластеров, их плотности, формы и расстояния между ними. Среди полученных результатов были выбраны наиболее правдоподобные, по растру гравитационного поля в свободном воздухе. Результаты кластеризации по спектральным характеристикам позволяют с высокой точностью выделить океанический, континентальный и переходный типы земной коры. Кроме того, в пределах океанической коры выделяются крупные тектонические и вулканические поднятия, а также районы, отличающиеся разными скоростями и направлением спрединга, что позволяет использовать данную методику для последующей геодинамической интерпретации.

СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ В РАЙОНАХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СПРЕДИНГОВЫХ ХРЕБТОВ И ВНЕОСЕВЫХ МАНТИЙНЫХ ПЛЮМОВ

В. А. Боголюбский В.А.^{1, 2}

¹ – *Московский Государственный Университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия;*
bogolubskiyv@yandex.ru

² – *Геологический институт РАН, г. Москва, Россия*

Срединно-океанические хребты (СОХ) являются планетарной структурой и протягиваются через все океаны на расстояние около 70 тыс. км. Рельеф и глубинное строение рифтовых зон СОХ отличаются в основном в зависимости от скорости спрединга. В районах проявления горячих точек на оси хребта или в непосредственной близости от него строение срединно-океанических хребтов также может значительно отличаться. Области взаимодействия срединно-океанических хребтов и горячих точек выделяются значительным разнообразием в структурном и эволюционном аспектах что контролируется целым рядом факторов, связанных с геометрией межплитных границ, строением литосферы и астеносферы, эволюцией океанического бассейна в целом, геодинамическими обстановками развития хребтов.

Для исследования влияния внеосевых горячих точек на строение спрединговых хребтов был применен метод физического моделирования. Вещество, используемое в модели, является смесью жидких и твердых углеводородов и соответствует критерию подобия океанической литосферы. Для визуализации результатов экспериментов используются термическое поле и цифровые модели рельефа. Изначальная конфигурация модели представляла собой рифтовую зону СОХ с утоненной литосферой и расположенный на расстоянии от неё локальный источник нагрева (ЛИН). Основными изменяемыми параметрами модели были расстояние от центра ЛИН до рифтовой зоны, глубина расположения ЛИН и его мощность. Влияние горячих точек на рельеф определялось по соотношению минимального медианного значения расчленённости модельного рельефа в области влияния горячей точки к средним медианным значениям.

Для всех характеристик были получены линейные зависимости вертикальной расчленённости рельефа от параметров горячей точки. При этом, полученные зависимости хорошо соотносятся с природными данными: как и в эксперименте, при влиянии внеосевой горячей точки на СОХ происходит изменение рельефа в сторону характеристик свойственных более быстрому спредингу, а расчленённость хребта значительно уменьшается. Полученные зависимости позволяют количественно охарактеризовать параметры внеосевых горячих точек при их взаимодействии с СОХ.

ОБЗОР ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ КРЫМСКОГО РЕГИОНА

И. В. Бондарь

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; bond@ifz.ru

Изучению палеонапряжений Горного Крыма посвящено множество работ различных исследователей, есть работы как регионального характера, охватывающие территорию всего полуострова, так и локального, вплоть до подробного описания одного обнажения. В данной работе проведен анализ этих исследований, с целью выявления характеристик и закономерностей полей палеонапряжений. В пределах Горного Крыма многими авторами в основном выделяется два региональных поля напряжений, причем оба сдвиговые, с северо-западной и северо-восточной ориентировкой оси максимального сжатия. Эти два поля напряжений обуславливают особенности тектоники изучаемого региона – преобладание диагональных сдвиговых систем разломов с северо-восточным и северо-западным простиранием, кинематика которых может быть как правосдвиговая, так и левосдвиговая, в зависимости от преобладания того или иного поля напряжений. Результаты тектонофизических работ локального характера указывают на наличие многочисленных неоднородностей в региональных полях напряжений

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ ТРЕЩИН В ПЛАСТАХ НЕФТЕГАЗОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ, РАСПОЛОЖЕННОГО В ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

И. А. Воронов^{1, 2}, Н. В. Дубиня^{1, 2}

¹ – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; ivanvoronov1996@yandex.ru*

² – *Московский физико-технический институт, г. Москва, Россия*

Трещиноватость горных пород указывает на наличие и распространение трещин в горных породах, а также оказывает существенное влияние на их физические свойства, такие как проницаемость, пористость, прочность и др. Естественная трещиноватость определяет наличие трещин в горных породах, возникших в результате природных геологических процессов, а не искусственного воздействия.

В данной работе представлены результаты по построению одномерных и трехмерной геомеханических моделей и анализу естественных трещин на нефтегазовом месторождении Западной Сибири. Геомеханическое моделирование позволяет определить распределение напряжений и деформаций в горных породах, что является основными характеристиками напряженно-деформированного состояния (далее - НДС) горных пород. НДС и естественная трещиноватость горных пород тесно взаимосвязаны и оказывают взаимное влияние друг на друга. Эта связь является ключевым фактором, определяющим механическое поведение массивов горных пород, их устойчивость и проницаемость.

В ходе одномерного моделирования НДС была проведена оценка изменений напряжений, деформаций и других геомеханических параметров с глубиной. Для моделирования использовались результаты геофизических исследований скважин (ГИС), различная геологическая информация, данные конструкции скважин. Были получены основные упруго-прочностные свойства, профили порового давления и трех главных напряжений в каждой скважине, все результаты были откалиброваны на результаты лабораторных исследований керна и фактические замеры давлений.

Следующим этапом было изучено НДС естественных трещин – зная параметры ориентаций трещин из данных интерпретации пластовых микроимиджеров и используя профили напряжений из одномерной модели, в соответствии с концепцией критически напряженных трещин Д. Бартона, были получены нормальное и касательно напряжения, действующие на плоскость каждой трещины.

При трехмерном моделировании данные по каждой скважине использовались для формирования объемных результатов по всему месторождению. В результате были пространственно распространены упруго-прочностные свойства и три главных напряжения в кубическом виде для исследуемой площади.

МУЛЬТИДИСЦИПЛИНАРНАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

О. В. Гайдаленок¹, А. И. Сысолин², С. А. Пулинец³, А. Сеспед⁴, С. Тосо⁵, М. Браво⁶

¹ – Независимый исследователь, г. Монтевидео, Уругвай; ogaidalenok@gmail.com

² – *Shallow Earth Technologies Inc.*, г. Калгари, Канада

³ – Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

⁴ – Национальный институт Андреса Бэйо, г. Сантьяго де Чили, Чили

⁵ – Технический университет Федерико Санта-Марии, г. Вальпараисо, Чили

⁶ – Адвентистский Университет Чили, Центр научного приборного обеспечения, г. Чийан, Чили

Запущена новая инициатива по прогнозированию землетрясений, целью которой является интеграция всех возможных эффективных предвестников для разработки комплексной системы прогноза.

Наша задача – объединить различные типы предвестников, включая:

- Физику атмосферы и ионосферы: атмосферный химический потенциал (АСР), концентрация скрытой теплоты (ЛНС), суммарное электронное содержание (ТЕС), струйные течения (jet streams);

- Геодезию: данные GPS (глобальной навигационной спутниковой системы) и измерения InSAR (интерферометрия с синтезированной апертурой);

- Геофизику: магнитные аномалии, гравиметрические аномалии (в том числе данные GOCE – спутника по гравитационному полю и циркуляции океана), микросейсмические аномалии, а также снижение параметра b (показывающего соотношение слабых и сильных землетрясений) в уравнении Гутенберга-Рихтера перед землетрясениями;

Радон (Rn), вероятно всего, связан с сейсмической активностью, так как его концентрация в почве, подземных водах и атмосфере может изменяться перед землетрясениями. Активность радона оценивается через его влияние на приповерхностный атмосферный слой с помощью АСР.

Были проведены расчеты АСР для 70 землетрясений магнитудой более 7 за последние 5 лет. В системе реализован алгоритм обнаружения аномалий на основе LSTM (долговременной кратковременной памяти, алгоритм машинного обучения). Было установлено, что в 91% проанализированных случаев перед землетрясениями наблюдалась аномалия АСР. Были рассчитаны аномалии АСР перед землетрясениями Вальдивия 1960 г. (магнитуда 9.5), Суматра 2004 г. (магнитуда 9.2), Мауле 2010 г. (магнитуда 8.8) и Икике 2014 г. (магнитуда 8.2), а также рядом других событий.

Можно предположить, что миграция мантийных флюидов может играть роль в триггерном механизме землетрясений, согласно ряду опубликованных работ по геохимической характеристике и мониторингу геофлюидов в рамках тектонофизических и сейсмологических исследований.

Проект направлен на превращение прогнозирования землетрясений в обоснованную научную дисциплину, подобную современным методам прогнозирования погоды.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ ОТРЫВНОЙ ТРЕЩИНОВАТОСТИ В ОСАДОЧНЫХ БАСЕЙНАХ

А. Гараванд¹, Ю. Л Ребецкий¹

¹ – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; garavand@ifz.ru*

В работе выполнено численное моделирование условий формирования отрывной трещиноватости в осадочных бассейнах с использованием метода конечных элементов. Расчёты проведены в постановке с учётом эффективного давления флюида, без применения связанного пороупругого подхода. При моделировании использованы эмпирические зависимости механических параметров осадков от глубины, включая предел текучести на сдвиг, коэффициент Пуассона, плотность и уровень флюидного давления.

Результаты вычислений показывают, что на глубинах порядка 50 м эффективные горизонтальные напряжения становятся отрицательными, то есть давление флюида в порах и микротрещинах превышает уровень горизонтального сжатия в твёрдом скелете осадка. При дальнейшем погружении среднее эффективное напряжение, изначально сжимающее, имеет тенденцию переходить в растягивающий режим. Сравнение параметров напряжённого состояния с характеристиками прочности осадков позволяет выделить глубинные интервалы, благоприятные для образования хрупких отрывных трещин.

Таким образом, предложенный подход подтверждает возможность формирования отрывной трещиноватости вместо сдвиговых разрушений в процессе диагенеза.

АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЯ ТОЛСТОСТЕННОГО ЦИЛИНДРА С УЧЁТОМ НЕУПРУГОГО ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛА

А. Гараванд¹

¹ –Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; garavand@ifz.ru

В данной работе выполнен анализ разрушения толстостенного цилиндра с учётом неупругого поведения материала. Модифицированные эксперименты на толстостенных цилиндрах были проведены для нескольких типов горных пород, что позволило воспроизвести условия напряжённого состояния, характерные для околоскважинных областей. Особое внимание уделено роли пластической деформации в механизме разрушения, а также её влиянию на геометрию образующихся зон повреждения.

Для интерпретации результатов разработана численная модель методом конечных элементов с использованием критерия Друкера–Прагера, позволяющая учесть эффекты промежуточного главного напряжения. Численные расчёты были верифицированы на основе лабораторных данных, после чего применены для построения базы данных, связывающей приложенные напряжения с параметрами зон разрушения цилиндра, включая глубину и ширину вывалов. На основе этого массива данных обучена модель машинного обучения, основанная на GMDH (Group Method of Data Handling). Алгоритм обеспечил выявление устойчивых корреляций между условиями нагружения и характеристиками разрушения, предлагая прозрачные математические зависимости, удобные для инженерных приложений.

Сопоставление экспериментальных наблюдений, численных результатов и предсказаний модели GMDH показало их высокое согласие, что подтверждает необходимость учёта неупругого поведения материала при анализе разрушения толстостенных цилиндров и оценке напряжённого состояния горных пород.

АЭРОТЕКТОНОФИЗИКА, ОПЫТ КАРТИРОВАНИЯ ТРЕЩИНОВАТОСТИ

Н. А. Гордеев

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

Аэро-исследования каждой отдельной исторической эпохи двигали прогресс большими шагами. Наше время также не стало исключением и последние два десятилетия появился ещё один масштабный уровень подобных исследований – применение беспилотных летательных аппаратов. В данном исследовании используется малогабаритный беспилотник для создания обычных фотографий (оптический диапазон). Далее методами фотограмметрии создается 3D поверхность интересующих нас объектов. При достаточном количестве спутников на небосводе для привязки GPS координат мы получаем сантиметровую точность измерений на наших 3D поверхностях.

В результате мы применяем данный опыт для проведения структурно-геологических исследований объектов интереса. И значительно расширяем базу данных различных объектов (разломы, складки, трещины, жилы, зоны дробления и др.) с минимальными искажениями. Мы рассмотрим полный цикл исследования на примере стенок заброшенных и действующих карьеров с выводом на готовый результат.

КИНЕМАТИКА РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ ОТКРЫТОГО ТИПА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ О ПОЯСАХ ТРЕЩИНОВАТОСТИ В СРАВНЕНИИ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ДРУГИХ МЕТОДОВ ТЕКТОНОФИЗИКИ

Н. А. Гордеев¹, Л. А. Сим¹

¹ – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; gord@ifz.ru*

В данной работе применен метод анализа разломов по поясам трещиноватости В. Н. Даниловича (1961). Суть метода заключается в анализе круговых диаграмм полюсов трещин, образованных вблизи более крупного разлома, образующих пояс трещиноватости. Ось такого пояса перпендикулярна направлению движения разлома и лежит в его плоскости. С помощью данного метода происходит выявление ориентировки движений по сместителям крупных тектонических разрывов, расчленение крыльев разрывных смещений на отдельные чешуи или блоки, понимание происхождения трещин, вмещающих жильные тела или нарушающих их. Он может использоваться, как в детальных, так и в региональных исследованиях, при картировании тектонических разрывов, их диагностике и структурном анализе рудных полей и месторождений, расположенных в их крыльях.

По результатам были определены наиболее характерные элементы разломной структуры месторождения. Эти структуры являются основой для выявления особенностей и создания картографической модели разломной тектоники с кинематикой.

О ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ НА О. САХАЛИН В КАЙНОЗОЕ

В. А. Дегтярев¹, П. А. Каменев¹

¹ – *Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия;
degtyarevvladislav96@yandex.ru*

Формирование геологической структуры острова Сахалин в кайнозое обусловлено подкоровыми мантийными потоками. Процесс описывается с помощью геодинамической модели верхнемантийной возвратной ячейки. Модель предполагает обстановку, когда нижняя относительно холодная горизонтальная ветвь мантийного потока течет под континент вдоль переходной зоны между нижней и верхней мантией. При этом, верхняя разогретая ветвь формирует возвратный поток вещества под литосферой в сторону зоны субдукции. В результате в тыловой зоне континента формируются структуры растяжения земной коры. Рассмотрение современных движений земной коры позволяет сделать вывод о том, что на современном этапе, выделенный механизм продолжает играть существенную роль в формировании важнейших структур острова. Исходя из выбранной модели и проведенного анализа установлено, что формирование геологических структур острова происходит в транспрессионной геодинамической обстановке. Эта обстановка является результатом взаимодействия двух геодинамических процессов, возникших и протекающих независимо друг от друга, вместе с тем, обусловленных единым глобальным механизмом. Проведенная временная корреляция региональных тектонических событий, позволила уточнить время начала Сахалинской фазы складчатости и формирования Хоккайдо-Сахалинской системы правых сдвигов.

Корреляции времени формирования и развития основных геологических структур Охотоморского и Япономорского регионов, позволяет оценить время начала развития Хокайдо-Сахалинской системы правых сдвигов как среднеэоценовое (~45 млн. лет). С достаточно коротким периодом интенсификации движений в раннем миоцене (~18–15 млн. лет), соответствующим непродолжительной фазе активного рифтогенеза Японского моря. В настоящее время процесс формирования Хокайдо-Сахалинской системы правых сдвигов, сопряжен с процессом коллизии Охотской и Амурской плит, который начался в позднем плиоцене и проявился началом Сахалинской фазы складчатости (~3 млн. лет назад), а также остановкой раскрытия Японского моря. Примерно этому времени соответствует начало быстрой фазы байкальского рифтогенеза, в результате которого, скорость движения Амурской плиты в восточном направлении стала выше скорости движения Охотской плиты, что привело к коллизии этих плит. Уточненные данные начала геодинамических процессов Охотоморского региона, могут быть использованы в основе моделирования истории развития региона, что является следующим этапом проведенного исследования.

ВЗАИМОСВЯЗЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЕЙСМИЧНОСТИ ЗАПАДНОГО САХАЛИНА И ОСОБЕННОСТЕЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ

В. А. Дегтярев¹, П. А. Каменев¹

¹ – *Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия;
degtyarevvladislav96@yandex.ru*

Западный Сахалин относится к районам с высоким уровнем сейсмической активности, что связывается главным образом с наличием субмеридиональных глубинных разломов, отделяющих Охотскую литосферную плиту от Амурской. Так же в пределах Западно-Сахалинской складчатой системы закартировано большое количество разрывных нарушений, различных по масштабу, структурному типу и морфологии. Часть из которых, судя по геологическим и сейсмологическим данным, а также данным наблюдений Глобальной навигационной спутниковой системы, продолжает оставаться активной и на современном этапе.

Цель работы заключалась в анализе распределения очагов землетрясений в земной коре Западного Сахалина и сопоставлении данных сейсмологии и структурной геологии, для уточнения строения и локализации зон дезинтеграции горных пород, соответствующих крупным разрывным нарушениям. В работе использовались сейсмологические данные из каталогов журнала «Землетрясения Северной Евразии» за период с 1997 по 2020 годы.

При анализе карты плотности распределения очагов коровых землетрясений отчетливо выделяется несколько максимумов. Наиболее сейсмически активные участки выделяются в районах мыса Ламанон и окрестностях городов Невельск, а также в южной части полуострова Крильон, окрестностях города Долинск и поселка Онор. При этом район перешейка Поясок характеризуется минимальной сейсмичностью. По глубине распределения очагов коровых землетрясений Западно-Сахалинская складчатая система отчетливо разделяется на северную и южную части, граница между которыми проходит севернее мыса Ламанон. Северная часть характеризуется расположением очагов землетрясений на глубинах до 10 км. Для южной части характерно более глубокое расположение очагов землетрясений (до 15 км). Анализ кинематики и конфигурации плоскости разломов по результатам решения механизмов очагов землетрясений также показал различия для северной и южной части складчатой системы. Для северной части характерна преимущественно взбросовая кинематика и западное падение нодальной плоскости в районе Центрально-Сахалинского разлома и восточное в районе Западно-Сахалинского разлома. Для южной части характерна преимущественно взбросовая кинематика иногда в сочетании со сдвиговой компонентой и западное падение нодальной плоскости в районе обоих разломов. При анализе морфологии структурных форм Западно-Сахалинской складчатой системы четко выделяется район перешейка Поясок. Для складчатой системы в целом, характерен эллипсоид деформации с северо-западным простиранием большой оси с незначительными вариациями для отдельных участков. Для района перешейка Поясок, эллипсоид деформации является зеркальным с северо-восточным простиранием большой оси. Также для этого района характерна очень низкая плотность закартированных разрывных нарушений. В целом, границы зон, с описанными выше особенностями распределения сейсмичности, соответствуют по широте границам крупных прогибов Татарского пролива и связаны с различными геодинамическими режимами, доминирующими в пределах каждого прогиба: транспрессионным в Северо-Татарском и Исикари-Западно-Сахалинском и транстенсионном – в Южно-Татарском прогибах.

СОВРЕМЕННЫЕ ДЕФОРМАЦИИ И СЕЙСМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ

С. О. Джанабилова¹, А. Г. Шералхан¹

*1 – Каспийский государственный университет технологий и инжиниринга имени Ш. Есенова,
г. Актау, Казахстан, samal-sima@mail.ru*

Дается детальное описание разломно-блоковой структуры Северного Тянь-Шаня. Показано, что раздробленная структура этого региона, отчетливо выраженная в перекрестно-решетчатом характере системы разломов, в позднее четвертичное время была “сконсолидирована” в несколько основных блоков: Киргизский, Иссык-Кульский, Заилийский, Чу-Кендыктасский и Чарынский.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОНЫ СДВИГА ПО РАЗЛОМУ ПРИ СОВРЕМЕННОМ ДВИЖЕНИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ

А. И. Докучаева

*Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г. Москва, Россия;
ana-anastasia2015@yandex.ru*

Рассмотрено изменение напряженно-деформированного состояния массива горных пород вследствие развития выработанного пространства рудника вблизи разлома. Оценена возможность активизации разлома и дополнительных подвижек по сместителю разлома, связанных с образованием значительных пустот в массиве вследствие извлечения полезного ископаемого. Определены зоны активных подвижек по разлому. Рассмотрены различные варианты исходного напряженного состояния массива – надвиг, сброс.

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В РЕГИОНЕ ЗАИЛИЙСКОГО АЛАТАУ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ЗА 2000–2024 ГГ.

С. К. Досайбекова¹, Ж. Б. Досымбекова¹, Ж. К. Жунусова¹

¹ – *Национальный научный центр сейсмологических наблюдений и исследований, г. Алматы, Казахстан; sdk_0102@mail.ru*

В докладе рассматриваются результаты анализа фокальных механизмов землетрясений энергетического класса $K \geq 9.6$, зафиксированных в пределах Заилийского Алатау за период 2000–2024 гг. В исследовании проанализированы 188 сейсмических событий с учетом пространственного распределения их эпицентров и их положения относительно активных тектонических разломов. Установлено, что среди механизмов подвижек в очагах землетрясений доминируют взбросовые типы, что свидетельствует о преимущественном сжатии в региональной системе напряжений. Количество взбросов значительно превышает количество сбросов и сдвигов, что указывает на тектонический режим, способствующий вертикальным движениям блоков земной коры. Проведенный анализ позволяет более точно оценить напряжённо-деформированное состояние литосферы. Результаты исследования могут быть использованы для уточнения моделей сейсмической опасности и прогноза сильных землетрясений в пределах Заилийского Алатау.

УПРУГИЕ И ПЛАСТИЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ В УТОЛЩАЮЩИХСЯ ОКЕАНИЧЕСКИХ ПЛИТАХ

М. Н. Евсеев

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; evseev.michail@gmail.com

Обычно при расчетах изгиба океанических плит их толщины $h(x)$ аппроксимируются кусочно постоянными функциями. В работе расчет проводится численно для любой зависимости толщины плиты от расстояния до зоны субдукции. В близи зон субдукции в утолщенной части плиты напряжения превышают предел прочности, и возникают зоны пластичности. В работе сначала в первом приближении плита считается упругой наблюдаемой толщины. Численно решается дифференциальное уравнение для функции упругого изгиба плит и рассчитываются поля напряжений. Выделяются зоны, где напряжения превышают предел прочности и возникает пластичность. Находится переменная толщина оставшейся упругой части плиты и для нее проводится повторный расчет уточненного изгиба и полей напряжений и зон пластичности второго приближения.

Приводятся результаты для Японской части Тихоокеанской плиты.

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ИМПУЛЬСОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО НАГРЕВУ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД

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

¹ – *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия;
indakov.gs16@physics.msu.ru*

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

При анализе процессов разрушения горных пород в лабораторных условиях возможен учет данных различной природы. Сочетания данных и их вариации могут проявлять характерную структуру (паттерн) и образовывать группы (агломераты) в многомерном признаковом пространстве. Это может позволить отслеживать развитие конкретной трещины или определенного типа трещин, а также выявлять новые закономерности разрушения материалов.

В работе анализировались эксперименты с несколькими образцами. Рассмотрены параметры импульсов термически стимулированной акустической эмиссии (ТАЭ) для экспериментов по нагреву образцов песчаников с выделением групп импульсов, волновые формы которых характеризуются высоким коэффициентом взаимной корреляции. Проведен анализ параметров импульсов ТАЭ проведен с привлечением методов машинного обучения. В задаче классификации удастся выделить все импульсы одной из групп. Это может быть обусловлено тем, что импульсы из выявленного кластера связаны с трещиной, которая активируется при определенной температуре (около 600°C) и при дальнейшем нагреве активно растет с увеличением энергии событий подрастания более чем в 2 раза, в то время как два других кластера могут иметь помеховое происхождение.

Для экспериментов с образцами метаморфизированных песчаников рассмотрены параметры ТАЭ и статистические параметры разрушения, рассчитанные на основе данных ТАЭ, такие как b-value и активность ТАЭ, а также привлечены данные о распределении зерен горной породы по размерам, полученные на основе анализа оптических микроснимков образцов, – прежде всего, медианный размер зерна. Верификация полученных оценок размеров зерен проведена методом акустической спектроскопии. Отмечены особенности взаимных распределений параметров для различного масштаба снимков.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СМЕЩЕНИЙ НА ЛАБОРАТОРНОЙ МОДЕЛИ РАЗЛОМА

П. А. Казначеев¹, Д. В. Краюшкин¹, З.-Ю. Я. Майбук¹, А. В. Пономарев¹, А. В. Патонин²,
Н. А. Закржевская¹, И. Н. Мигунов¹, В. В. Кох¹

¹ – Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; *p_a_k@mail.ru*

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

В работе представлены результаты экспериментального исследования разномасштабных движений в виде смещений на лабораторной слайдер-модели сейсмогенного разлома. В экспериментах регистрировался и анализировался перечень различных физических параметров, прежде всего, силовых и кинематических величин. Оценка разномасштабных движений стала возможна за счет сочетания разных датчиков кинематических величин – как высокочувствительных (LVDT-датчики смещения), так и быстродействующих (пьезоэлектрические акселерометры). Наблюдались медленные движения вдоль разлома (аналог асейсмического крипа), быстрые высокоамплитудные движения (модельные землетрясения), а также быстрые малоамплитудные движения, предположительно связанные со смещениями, неоднородными по разлому. Отдельно регистрировалась акустическая эмиссия, показавшая неравномерный характер развития микроразрушений вблизи момента модельного землетрясения. Приведено обсуждение представленных результатов.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКТИВНОЙ ТЕРМОГРАФИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ФЛЮИДОПРОНИЦАЕМОСТИ СДВИГОВЫХ ЗОН В АНАЛОГОВЫХ МОДЕЛЯХ: ПЕРВЫЙ ОПЫТ

А. Н. Корбутяк¹, Н. С. Фролова¹, И. А. Пантелеев², А. Ю. Изюмова^{2,3}

¹ – *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия;
korbutyakan@mail.ru*

² – *Пермский федеральный исследовательский центр УРО РАН, г. Пермь, Россия*

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

В данной работе представлены результаты выполнения физического аналогового моделирования с использованием современных методов неразрушающего контроля и диагностики. Одним из таких методов является активная термография, применяемая для выявления нарушений целостности материала, таких как трещины, пустоты, впадины и другие неоднородности. В геологии этот метод давно используется для исследования дефектов в скважинах, керне, в инженерной геологии и др. Для изучения внутренней структуры сдвиговых зон в аналоговых моделях данный метод был применен впервые.

В рамках исследования было выполнено моделирование обстановки простого сдвига на эквивалентных материалах (сухой песок и влажная глинистая паста) с одновременной фотофиксацией результата (для последующей корреляции цифровых изображений). В процессе экспериментов через равные интервалы времени сдвигание по «разлому в фундаменте» модели останавливалось для нагрева образующейся разрывной структуры. Нагрев и последующее остывание регистрировались с помощью инфракрасной камеры. Такое последовательное регистрирование хода структурообразования позволило скоррелировать эволюцию деформационного процесса с изменением температуры на поверхности модельного материала.

Сопоставление полученных результатов корреляции цифровых изображений (DIC) поверхности аналоговой модели с полями температур позволяют по-новому взглянуть на флюидный режим разломных зон.

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОКО-3 АБ-100МЗ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ И КОРЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ СЕВЕРНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА)

А. О. Королева

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; kao@ifz.ru

В работе рассматриваются возможности применения георадиолокационного комплекса ОКО-3 с одночастотной экранированной антенной АБ-100МЗ для изучения деформаций в четвертичных и коренных отложениях. Исследования проводились в окрестностях города Медвежьегорск. В ходе полевых работ проведена серия георадарных исследований и показаны особенности георадарной съёмки в условиях неглубоких прилегающих акваторий (мелких озёр, рек). Результаты интерпретации радарограмм позволили выявить аномалии, связанные с высокой разрушенностью и трещиноватостью горных пород. Работа демонстрирует эффективность применения одночастотной экранированной антенны 100 МГц как инструмента для детального изучения строения донных отложений и обнаружения разрывных нарушений различного происхождения.

ИЗУЧЕНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ, МОРФОЛОГИИ И КИНЕМАТИКИ РАЗЛОМОВ ОАЗИСА ХОЛМЫ ЛАРСЕМАНН (ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА) ПО РЕЗУЛЬТАТАМ 70-Й РАЭ

Н. С. Крикун¹, Н. А. Гордеев², Д. Е. Ушаков¹, И. А. Бабенко¹

¹ – Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия; nskrikun@gmail.com

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

В работе приведены результаты комплексного изучения морфологии, кинематики разрывных нарушений и связанных с ними пространственно-временных тектонических деформаций оазиса Холмы Ларсеманн (Восточная Антарктида). В основе работы использованы данные, полученные в ходе полевых исследований в сезоне 70-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ) при изучении деформаций на двух уровнях: макро и мезо. (от первых километров до первых сантиметров). Первый включает 3Д визуализацию и интерпретацию результатов аэрогеологической съемки, проведенной на объекте исследования с использованием БПЛА и линеаментный анализ данных дистанционного зондирования различного разрешения. Второй включает анализ замеров трещиноватости на опорных полигонах с фиксированием азимутов простирания, длины, степени раскрытости и заполнения трещин. Отдельный блок работ посвящен анализу рельефа структурно-геоморфологическим методом Л.А. Сим [1991, 2000], с помощью ПО SimSGM [Гордеев, 2019; Молчанов, 2022]. По результатам комплексной интерпретации и корреляции полученных данных детально охарактеризованы разрывные и пликативные структуры оазиса Холмы Ларсеманн, оценена их роль в геодинамической эволюции региона и реконструировано его новейшее напряженное состояние.

ОСНОВНЫЕ ЭНДОГЕННЫЕ ГЕООПАСНОСТИ В РОССИЙСКОМ СЕКТОРЕ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА

А. А. Крылов

Институт океанологии им. П. П. Шишова РАН, г. Москва, Россия; artyomkrlyv@ocean.ru

Арктический регион, включающий обширные шельфовые зоны, обладает огромным ресурсным и транспортным потенциалом и в настоящее время является ключевым для стратегического развития России. При освоении этого региона крайне важно избегать возникновения чрезвычайных ситуаций, которые могут повлечь за собой многочисленные негативные экологические и социально-экономические последствия. Поэтому при проектировании и строительстве объектов критической инфраструктуры в Арктике необходимо проводить качественные исследования потенциальных геопасностей. Рассмотрены и обобщены разрозненные сведения об основных геопасностях в российском секторе Северного Ледовитого океана, таких как землетрясения, подводные оползни, цунами, фокусированные флюидные выбросы (газовые сипы), рассмотрены закономерности их пространственного распределения и возможные связи с геодинамической обстановкой Арктического региона. В результате исследования выявлено, что основные закономерности взаимного распределения основных геопасностей российского сектора арктических морей определяются современной геодинамической обстановкой в регионе и историей геодинамического развития Арктики, а именно формированием оси спрединга и глубоководных впадин Северного Ледовитого океана. Подчеркивается высокая вероятность влияния сейсмотектонической активности на состояние подводной мерзлоты и массивированный выброс метана.

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МАССИВОВ ПОРОД ОСТРОВА ЮЖНАЯ ГЕОРГИЯ (АНТАРКТИКА)

М. А. Кузнецов¹, Н. А. Гордеев², Н. Н. Дунаев¹

¹ – *Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, г. Москва, Россия; KuzMiArGeo@yandex.ru*

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

Южная Георгия – гористый субантарктический остров в южной части Атлантического океана. Является продолжением Анд (Южно-Антильский хребет), сформированного в результате сложной тектоники плит (Южно-Американской, Антарктической и микроплиты Скотия). Сложен преимущественно осадочными и магматическими породами мезозойского возраста (юра, мел). Активная сейсмическая зона. Значительную часть острова покрывают ледники (до 60% площади).

По результатам структурно-геоморфологического анализа топографических и геологических карт, а также дешифрирования космических снимков острова Южная Георгия были определены наиболее характерные элементы геоморфологической структуры, которые являются основой для выявления особенностей и создания картографической модели разломной тектоники.

Тектонофизические исследования позволили определить сдвиговую компоненту смещения по главным разломам. Всего по морфологии и литературным источникам выявлено 15 главных разломов и 186 косвенных. Они сформированы в условиях сдвига по трансформным разломам плиты Скоша, все регистрируемые напряженные состояния имеют широкий разброс по простиранию осей сжатия. Северо-восточный участок охарактеризован субширотным направлением сжатия, в центральном и южном участке больше проявлено субмеридиональное сжатие.

Таким образом, производится оценка состояния новейшей тектоники острова Южная Георгия, построены геоморфологическая карта, схема новейших тектонических напряжений.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЕКОВОЙ ВАРИАЦИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ГЕОМАГНИТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА БАЙКАЛЬСКОМ И АЛТАЙСКОМ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛИГОНАХ ЗА 1997–2024 ГГ.

Д. А. Кулешов

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Россия;
kuleshovdmilalex@gmail.com*

Исследование сосредоточено на расчете вековой вариации геомагнитного поля, а также её учёте при геомагнитных наблюдениях. Предложенный метод определения вековой вариации геомагнитного поля базируется на аппроксимации данных полиномиальными поверхностями для исследовательских полигонов, размерами порядка от 100 до 500 км. Вековые вариации геомагнитного поля, предположительно, возникают из-за движения жидкости в жидком ядре на глубинах 3000 км, в то время как размеры сетей наблюдений находятся в пределах 500 км. Таким образом источники вековых изменений геомагнитного поля независимо от их конфигурации находятся гораздо глубже, чем источники литосферных аномалий, расположенных над поверхностью Кюри на глубине ~ 10–20 км. Следовательно, поверхности, представляющие пространственное распределение вековой вариации, должны иметь существенно меньший пространственный градиент, чем для литосферных аномалий. Таким образом, проблема заключается в разделении региональных и локальных сигналов от двух типов источников, расположенных на существенно разных глубинах. При этом максимальная степень полиномиальной поверхности зависит от размеров полигона и от требуемой точности выделения параметров геомагнитного поля.

Предлагаемый метод апробирован на данных ежегодных геомагнитных наблюдений на Алтайском (около 30 пунктов) и Байкальском (около 100 пунктов) геодинамических полигонах протяженностью ~120 и ~400 км соответственно в период с 1997 по 2024 гг. Выбор степени полинома целесообразно ограничивать тем порядком поверхности, которая с требуемой точностью описывает распределение вековой вариации геомагнитного поля по моделям главного геомагнитного поля, поскольку в наблюдаемых данных могут присутствовать индуктивные и ориентационные эффекты, связанные с намагниченностью горных пород и с неортогональностью векторов геомагнитного поля в пространстве.

Различия параметров вековой вариации геомагнитного поля, определённых по данным наблюдений и по данным модели главного магнитного поля (IGRF-14) может быть существенным для многих задач геомагнетизма, в частности, тектономагнетизма, где возникает задача выделения магнитных аномалий величиной первые единицы нТл, которые могут быть связаны с изменением геодинамического состояния земной коры региона.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ МИКРОИМИДЖЕРОВ

Д. Ю. Куприн¹, Н. В. Дубиня^{1,2}

¹ – *Институт физики Земли имени О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия;
kuprin.daniil.geo@gmail.com*

² – *Московский физико-технический институт, г. Москва, Россия*

Доклад описывает алгоритм, позволяющий в автоматическом режиме выделять естественные трещины на растровых изображениях, полученных при проведении исследований скважинными микроимиджерами. Автоматическая интерпретация происходит за счёт обработки растрового изображения микроимиджера в скользящем окне набором методов компьютерного зрения, включающим в себя методы бинаризации, скелетонизации, а также методы выделения границ объектов на изображениях. Целью автоматической интерпретации является достоверное выделение геометрических параметров естественных трещин – глубины залегания, азимута и угла падения. Результатом работы алгоритма являются выборки значений геометрических параметров для каждой выделенной естественной трещины. Учитывая специфику применяемых методов компьютерного зрения, а также зашумлённость обрабатываемых данных, необходима дополнительная обработка полученных выборок для получения достоверных геометрических параметров. Одним из возможных способов решения данной проблемы является использование подхода, основанного на распределениях Пирсона. В рамках данного подхода обрабатываются гистограммы выборок геометрических параметров естественных трещин и вычисляются моменты распределений, которые далее используются для определения типа распределения и его параметров. Используя эти параметры, единственным образом определяются непрерывные аналитические функции плотности распределений значений геометрических характеристик естественных трещин. Максимальное значение такой функции указывает на моду обрабатываемого распределения, которая является репрезентативным параметром обрабатываемого распределения. Также данный подход позволяет определить квантили распределений, что позволяет перейти к численной оценке достоверности определения геометрических параметров выделенных естественных трещин.

ОРИЕНТАЦИЯ ЗОНЫ ЛОКАЛИЗОВАННОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ В УСЛОВИЯХ ТРАДИЦИОННОГО И ИСТИННОГО ТРЕХОСНОГО СЖАТИЯ

Д. В. Ложкин^{1,2}, И. А. Пантелеев^{1,2}, В. Ляховский³

¹ – Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, Россия; lozhkin.d@icmm.ru

² – Пермский Федеральный Исследовательский Центр УрО РАН, г. Пермь, Россия

³ – Геологическая служба Израиля, г. Иерусалим, Израиль

Описание деформирования и разрушения горных пород при различных конфигурациях приложенных напряжений представляет собой одну из ключевых задач геомеханики. Для решения практических задач важным является вопрос об ориентации сколов (зон локализованной поврежденности) при тех или иных конфигурациях действующих напряжений. Из теории Кулона-Мора известно, что в случае традиционного трехосного сжатия (имеющего место на ряде месторождений полезных ископаемых), когда $\sigma_1 < \sigma_2 = \sigma_3$ (сжимающие напряжения отрицательные), ориентация зоны локализованной поврежденности определяется углом внутреннего трения породы. При этом вопрос об ориентации сколов в случае истинного трехосного сжатия, когда $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$, остается открытым. Экспериментальные результаты, полученные в последние несколько десятилетий, показали влияние на механические и прочностные свойства горных пород величины промежуточного главного напряжения. Аналогичное влияние можно ожидать и для ориентации зоны локализованной поврежденности. Еще одним открытым вопросом является степень влияния на ориентацию зоны локализованной поврежденности определенно ориентированной слоистости, присущей осадочным бассейнам. Актуальность данной задачи также определяется возможностью привлечения полученных результатов для уточнения методики оценки ориентаций природных напряжений по данным об ориентации систем сколов в случае, когда отсутствует вторая сопряженная система.

В настоящей работе для решения задачи об ориентации зоны локализованной поврежденности в горных породах в условиях традиционного и истинного трехосного сжатия используется модель нелинейной упругости академика В. П. Мясникова. Данная модель оперирует скалярным параметром поврежденности и учитывает зависимость упругих свойств от вида напряженно-деформированного состояния, а также связи сдвиговых и объемных механизмов деформирования (дилатансия). Поврежденная зона моделируется как тонкий слой с пониженными механическими характеристиками, а окружающий материал считается либо линейно-упругим изотропным, либо трансверсально-изотропным (слоистым) телом. Оптимальная ориентация зоны определяется из условия максимизации функционала, характеризующего скорость накопления поврежденности.

В результате решения задачи для изотропного материала и условия истинного трехосного сжатия показано, что с увеличением промежуточного напряжения угол наклона зоны относительно максимального главного напряжения уменьшается. Получены интервалы ориентаций, обеспечивающие значения функционала, близкие к максимальным (различие не превышает 1%), что позволяет учитывать наблюдаемый в лабораторных условиях разброс направлений разрушения, связанный с минеральным строением и имеющимися априори дефектами сплошности образцов. Кроме того, на основе анализа сдвиговых компонент тензора напряжений в плоскости зоны выполнена классификация возможных типов смещения.

ВЗАИМОСВЯЗЬ ФЛЮВИАЛЬНЫХ ФОРМ РЕЛЬЕФА С СОВРЕМЕННЫМИ ТЕКТОНИЧЕСКИМИ СТРУКТУРАМИ ТАМАНСКОГО ПОЛУОСТРОВА

Е. А. Мануилова

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

Современный облик Таманского полуострова низменный с холмистыми грядами, к которым местами приурочены грязевые вулканы. Несмотря на большое количество водных объектов (Азовское и Черное моря, Керченский пролив, многочисленные лиманы), постоянные водные потоки отмечаются в восточной части полуострова (р. Кубань, р. Гостагайка). Также на этой территории присутствуют археологические памятники различных культур и эпох. Из сочинений древних авторов (в частности, из «Географии» Страбона) следует, что земли к востоку от Керченского пролива представляли собой архипелаг островов, разделенных морскими проливами или речными рукавами. Однако, изучение космических снимков этой территории показывает, что в настоящее время даже около главных городов Азиатского Боспора (Фанагория, Гермонасса и др.) постоянные водотоки отсутствуют. Также Таманский полуостров – участок с интенсивной новейшей тектоникой, что проявляется в разноамплитудных скоростях вертикальных движений от -2 до +12 мм/год, наличии более 20 грязевых вулканов разной степени активности. Все эти данные указывают на то, что рельеф территории в позднем голоцене претерпел значительные изменения.

В работе представлены результаты выделения генетических типов флювиальных (современных и древних) форм рельефа Таманского полуострова, новейших и современных тектонических структур, а также показана их взаимосвязь между собой. Разные типы форм рельефа и тектонические структуры выделены при проведении визуального и автоматизированного дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли (космические снимки, радарные данные, аэрофоточъемка) и анализа топографических карт, а также морфометрического анализа современного рельефа. Верификация полученных данных проведена в ходе полевых исследований.

В результате работы впервые локализована древняя гидросеть Таманского полуострова, составлены схемы генетических типов флювиальных форм рельефа, построена структурно-геоморфологическая карта района, выявлена приуроченность генетических типов флювиальных форм рельефа к определённым элементам тектонических структур (разломы, локальные поднятия и впадины и т.д.). В работе показано, что территории с высокой плотностью поселений 2-й пол. VI в. до н. э. – 1-й четв. V в. до н.э. соответствуют районам максимумов древних водотоков. Полученные результаты необходимы для уточнения палеогеографической реконструкции очертаний Азиатского Боспора в историческое время.

ТЕКТОНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ФЛАНГА БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ. РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ХОДЕ ЭКСПЕДИЦИИ РГО ПО МАРШРУТУ БАЙКАЛО-АМУРСКОЙ МАГИСТРАЛИ

Е. А. Мануилова¹, Т. Ю. Тверитинова^{1, 2}

¹ – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e-manuilova@ifz.ru*

² – *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

Результаты совместных исследований современного напряженного состояния коры Байкальской рифтовой системы (БРС), выполненные сотрудниками ИФЗ РАН г. Москва и ИЗК СО РАН г. Иркутск [Ребецкий, Добрынина, Саньков, 2022] в 2020-2024 гг., позволили провести тектонофизическое районирование активных разломов по уровню кулоновых напряжений, определяющих близость разломов к критическому состоянию [Ребецкий, Добрынина, Саньков, 2024]. В результате этих исследований выделены области, для которых вдоль разломов выделяются участки высокого уровня кулоновых напряжений. Эти области могут рассматриваться как очаги возможных сильных землетрясений с магнитудой 6.5–7.0. Часть таких участков расположена в районе Байкало-Амурской магистрали. Поскольку для этих зон характерна высокая сейсмичность и различные проявления неустойчивости горных пород, то для этих участков необходимо уточнение локального напряженного состояния полевыми тектонофизическими методами.

В связи с этим, с 19 августа по 3 сентября 2025 года сотрудники ИФЗ РАН приняли участие в экспедиции по маршруту Байкало-Амурской магистрали, организованной Русским географическим обществом. Исследования были посвящены изучению сеймотектонических проявлений на опасных участках активных разломов северо-восточного фланга Байкальской рифтовой зоны. В ходе экспедиции изучены структурно-геологические особенности горных пород и проведены полевые тектонофизические замеры в пределах трех полигонов: Северобайкальский, Северомуйский и Чарский.

В докладе представлены результаты анализа напряженно-деформированного состояния массивов горных пород, полученные по собранным полевым замерам. Имеющиеся в точках наблюдения характеристики локальных стресс-тензоров позволили определить усредненное региональное поле напряжений, ответственного за формирование региональной тектонической структуры.

МАГНИТУДНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КЛЮЧЕВСКОЙ ГРУППЫ ВУЛКАНОВ

А. П. Молокова¹, А. А. Скоркина¹

¹ – *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва, Россия; molokovaap@ty.msu.ru*

Ключевская группа вулканов представляет собой уникальный объект для исследований, т. к. является одной из самых крупных и активных вулканических структур в зоне субдукции. Вулканические землетрясения происходят на вулканах или вблизи них, связаны с вулканическими процессами и отличаются от тектонических генерирующими механизмами и характеристиками сейсмических сигналов. Извержения вулканов представляют опасность для населения и инфраструктуры. Поэтому для мониторинга вулканической активности важен анализ получаемых сейсмических сигналов, т. к. извержения часто сопровождаются усилением сейсмической активности. Оценка магнитуды землетрясения является важной характеристикой сейсмичности, однако вулканические землетрясения характеризуются слабыми сейсмическими сигналами.

Традиционно камчатские землетрясения оцениваются в энергетических классах, которые затем приводятся к локальным магнитудам. В работе представлены дополнительные оценки – моментные магнитуды MW и магнитуды по длительности MD. Оценка магнитуды по длительности MD позволяет быстро и надежно оценить силу землетрясения с помощью довольно простой процедуры, основанной на измерении продолжительности зарегистрированного сейсмического сигнала. Данная процедура была автоматизирована и применена для сейсмограмм, полученных в рамках уникального эксперимента KISS (Klychevskoy Investigation – Seismic Structure of an Extraordinary Volcanic System). В результате их работы было записано 2136 событий, из которых выделено 343 вулканических землетрясения под Ключевской группой вулканов. Камчатским филиалом Единой Геофизической службы Российской академии наук были оценены локальные магнитуды записанных событий, диапазон магнитуд ML = 0.35–2.9. Данные оценки были сопоставлены с полученными оценками моментных магнитуд и магнитуд по длительности.

Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда №25–17–00094 «Создание методики расчета зависящей от времени сейсмической опасности».

SIMSGM: АВТОМАТИЧЕСКИЙ ПОИСК УЧАСТКОВ ЛОКАЛЬНОГО СЖАТИЯ И РАСТЯЖЕНИЯ

А. Б. Молчанов¹, Н. А. Гордеев¹

¹ – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; alexeybm2009@gmail.com*

В течение многих лет в лаборатории фундаментальных и прикладных проблем тектонофизики ИФЗ РАН ведется усовершенствование работы структурно-геоморфологического (СГ) метода Л.А. Сим [Сим, 1991]. Было разработано и многократно апробировано программное обеспечение (ПО) по автоматизации этого метода – SimSGM [Гордеев, 2019, Молчанов, 2022].

К настоящему моменту эта задача полностью решена. В зависимости от доступных пользователю данных программа предлагает гибкий функционал для получения результата. Если у пользователя есть данные о разрывных нарушениях на исследуемом участке (разломах, сколах, отрывах) в цифровом виде, ему достаточно загрузить их в ПО и выполнить статистический анализ, получив ориентации осей неотектонических напряжений в любой точке изучаемой области. Если есть данные только о крупных разрывных нарушениях (разломах), то пользователь может загрузить в ПО также спутниковый снимок местности или карту высот рельефа и провести автоматический линеаментный анализ, выявляющий нарушения меньшего масштаба, после чего становится возможным провести анализ в областях динамического влияния разломов. Если же нет вообще никаких данных о разрывных нарушениях, ПО позволяет выполнить автоматический линеаментный анализ по всему участку, найти наиболее вероятное поле тектонических напряжений и предсказать локализацию крупных разрывных нарушений, ему соответствующих. Все расчёты, производимые программой, выполняются на GPU, и занимают от нескольких секунд до первых минут на актуальном персональном компьютере.

Текущие исследования направлены на автоматизацию определения зон локальных растяжений и сжатий в области динамического влияния разрывных нарушений. Поиск этих зон имеет ключевое значение как для инженерной геологии, так и для разведочной геофизики. В инженерно-геологическом аспекте эти зоны контролируют устойчивость горных пород, влияют на распределение напряжений и формирование тектонических нарушений, что напрямую связано с рисками при строительстве сооружений, прокладке тоннелей и разработке карьеров. Для поисковой геологии и разведки полезных ископаемых зоны разуплотнения часто являются рудоконтролирующими структурами, поскольку именно в них концентрируются флюиды, формируются благоприятные условия для образования гидротермальных месторождений, а также активизируются процессы миграции и аккумуляции углеводородов. Анализ напряжённо-деформированного состояния земной коры с помощью СГ метода Сим позволяет прогнозировать расположение перспективных участков и оптимизировать поисковые работы.

Автоматический поиск зон локального сжатия и растяжения производится в ПО SimSGM следующим образом. Во-первых, по СГ методу Сим производится прямой анализ ориентаций осей неотектонических напряжений в зонах динамического влияния разрывов. Во-вторых, для каждого разрыва строится карта поля расстояний до ближайшей его точки. В-третьих, эти карты накладываются друг на друга для пересекающихся разрывов, секторы, определяемые пересечениями, маркируются в соответствии с взаимными направлениями осей сжатия и растяжения. Наконец, строится пространственное распределение нормировочных коэффициентов в зависимости от расстояния до ближайшей точки пересечения разрывов, характерный масштаб распределения выбирается в соответствии с длиной разрыва. Полученная ранее карта с отмеченными зонами умножается на поле нормировочных коэффициентов.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ДЗЗ В ПО SIMSGM

А. Б. Молчанов¹, Н. А. Гордеев¹

¹ – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; alexeybm2009@gmail.com*

Работа посвящена описанию опыта применения усовершенствованной версии структурно-геоморфологического метода реконструкции сдвиговых неотектонических напряжений Л.А.Сим. SimSGM позволяет выяснить ряд параметров: локальные напряженно-деформированные состояния, зоны сжатия и растяжения, геодинамические условия транспрессии и транстенсии. Реализован новый подход к поиску разрывных нарушений, основанный на статистическом анализе геометрии линеаментов. И многое другое. SimSGM был применен на разных участках земной коры, это платформы, плиты, складчатые области и даже на острова. Каждый тип коры и местности подразумевает под собой подбор критериев применимости и разное качество результатов. Также уже существует целый ряд готовых результатов о применении на месторождениях углеводородов и россыпей. Подводя итоги обсудим границы применимости и главные преимущества SimSGM над аналогами.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАТУХАНИЯ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБЛАСТИ РАЗВИТИЯ ЛОКАЛИЗОВАННОГО СДВИГА

Д. С. Мягков

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

Изучается проблема дальнего действия разлома (или зоны локализованного сдвига) в упруго-пластической среде, находящейся в закритическом состоянии (за счёт действия литостатического напряжения). Вопрос о характере затухания напряжённого состояния вдали от сдвигового разрывного нарушения является важным как для тектонофизики, в частности для вопроса о дальнем действии очага землетрясения, так и для геомеханики, где особую актуальность исследование формирования напряжённого состояния в трещиноватой среде получает в приложении к задачам ГРП. При этом очевидные ограничения экспериментальных данных и физического моделирования можно компенсировать применением математического моделирования. Представлена численная модель затухания напряжений в области развития локализованного сдвига, показаны особенности затухания для случая упругой среды и упруго-пластической с различными законами пластичности.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ В ОБЛАСТИ РАЗВИТИЯ МАГМАТИЧЕСКИХ ТЕЛ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ. НАПРЯЖЁННО- ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КОРЫ ЦЕНТРАЛЬНО-АЗИАТСКОГО СКЛАДЧАТОГО ПОЯСА И КОЛЬСКОГО РЕГИОНА

Д. С. Мягков

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

В исследовании представлены численные геодинамические модели нагружения Земной коры при формировании интрузивных тел различной геометрии. Методом численного моделирования рассчитан уровень напряжений коры, связанный с давлением магмы системы транскоровых интрузий, показаны особенности формирующихся геодинамических режимов напряжённого состояния коры. представлена математическая модель формирования напряжённо-деформированного состояния земной коры Центрально-Азиатского складчатого пояса за счёт внедрения интрузий магматических поясов позднего палеозоя-раннего мезозоя. В численной модели представлены магматические пояса девон-юрского возраста, формирование которых связано с действием Алтайской, Селенгинской и Южно-Монгольской вулканических дуг. Рассматривается вопрос о происхождении аномальных напряжений горизонтального сжатия Кольского региона, создана численная модель нагружения коры при формировании Хибинского и Ловозёрского интрузивов.

УТОЧНЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА В РАЙОНЕ ДЕЛЬТЫ Р. ЛЕНЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

М. А. Новиков¹, А. А. Крылов¹

¹ – *Институт океанологии им П. П. Шишова РАН, г. Москва, Россия; mihail.novikow@mail.ru*

В докладе представлены новые результаты по уточнению параметров сейсмического режима района дельты реки Лены, одного из наиболее сейсмоактивных в российской Арктике. На основе анализа обновленного сводного каталога землетрясений, построенного с привлечением глобальных и региональных данных о сейсмических событиях за период 1918–2022 гг., а также скоростной модели литосферы и механизмов очагов, выделены две ключевые разломные зоны — сейсмолинеаменты «Оленек» и «Буор-Хая». Для каждой зоны рассчитаны графики повторяемости землетрясений по закону Гутенберга–Рихтера, параметры напряжённого состояния и глубины сейсмоактивного слоя.

Сейсмолинеамент «Оленек» характеризуется преимущественно сдвиговым режимом, в то время как «Буор-Хая» – растяжением коры со сдвиговой компонентой. Основная часть землетрясений происходят на глубинах до 30 км, в пределах земной коры. Выявленная скоростная модель поперечных волн согласуется с другими геофизическими данными и подтверждает наличие характерных для региона глубинных границ.

Сопоставление распределения эпицентров с картами общего сейсмического районирования ОСР-97 и ОСР-2016 выявило некоторые расхождения между геометрией и характеристикой приведенных в них сейсмолинеаментов и современными сейсмологическими данными. Это указывает на необходимость уточнения существующих моделей с учётом локальных особенностей. Представленные результаты могут внести вклад в уточнение районирования сейсмической опасности в дельте Лены.

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ УЧАСТКОВ КОРЫ, ОПАСНЫХ ДЛЯ СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

И. И. Нугманов^{1,2}

¹ – Университет Иннополис, г. Иннополис, Россия; i.nugmanov@innopolis.ru

² – Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

Топологическая и реологическая неоднородность тектонических разломов контролируют пространственное распределение сейсмичности и локализацию крупных мелко фокусных землетрясений. Структурные особенности разломов отчетливо проявляются в характеристиках фоновой сейсмичности. В данной работе представлено исследование алгоритма кластеризации (метод машинного обучения «без учителя») для выявления сейсмогенных участков. Алгоритм предназначен для анализа фоновой сейсмичности с целью определения тектонических «неровностей» – асперити. Участки асперити, обусловленные морфологической неоднородностью разлома, соответствуют топологически плотным скоплениям фоновых сейсмических событий, названным сейсмогенными участками.

Предложенный подход применен для анализа сейсмичности Курило-Камчатской зоны субдукции, одной из наиболее активных частей взаимодействия океанической и континентальных плит. Использован региональный каталог землетрясений Камчатки за период с 1990 по 2024 гг. с представительной магнитудой полноты $M_s = 3.1$. Сейсмичность была разделена на фоновую и афтершоковую компоненты методом «ближайшего соседа». Затем методом нечеткой (fuzzy) кластеризации были выявлены пространственно плотные скопления фоновой сейсмичности, интерпретируемые как сейсмогенные участки.

Результаты показали, что 81% (18 из 22) сильных землетрясений (магнитудой 6–7) произошло внутри выявленных сейсмогенных участков. Кроме того, эпицентры 95% (19 из 20) крупнейших землетрясений (магнитудой выше 7) располагались вблизи границ таких участков. Характерный размер сейсмогенных участков в Камчатской зоне варьирует от 85 до 250 км, что соответствует источникам землетрясений магнитудой 7.0–7.8. Разрыв при крупнейших землетрясениях (магнитудой более 8) охватывает несколько участков, расстояние между которыми составляет менее половины длины отдельного участка.

СТРУКТУРНЫЙ ФАКТОР ПРИ ПРОГНОЗЕ ОПАСНОСТИ ВНЕЗАПНЫХ ВЫБРОСОВ УГЛЯ И ГАЗА

Б. Н. Пашичев

*Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова РАН, г. Москва,
Россия; borisnik-pa@yandex.ru*

Проведены исследования о роли структурного фактора в вопросе склонности угольных пластов Кузнецкого, Донецкого и Печорского угольных бассейнов к опасным явлениям. В работе анализировались особенности структуры каменных углей на микронном уровне для различных групп углей. Использована разработанная методика анализа цифровых снимков поверхности угольных проб с помощью диаграмм информационных мер энтропии и сложности. Показано существенное различие в поведении распределения значений мер для проб из участков пластов склонных и не склонных к внезапным выбросам угля и газа. Применение методики, учитывающей структурный фактор позволит повысить достоверность данных при прогнозе опасности внезапных выбросов угля и газа.

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТИХООКЕАНСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАМЧАТКИ

А. Ю. Полец

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия; a.polec@mail.ru

Камчатский отрезок островной дуги является одним из наиболее сейсмоактивных районов Земли и имеет сложное строение сейсмофокальной зоны. Фокальная зона пересекает все прибрежные структуры восточной Камчатки и тянется практически параллельно глубоководной впадине и поясу вулканов. 30 июля в 11:24 по местному времени (29 июля в 23:24 по Гринвичу), в исследуемом регионе произошло сильнейшее за всю историю наблюдений землетрясение, моментная магнитуда – 8.7. До этого самым сильным считалось Камчатское землетрясение 5 ноября 1952 г. На сегодняшний день Камчатское землетрясение 30(29) июля 2025 года является сильнейшим событием в мире после землетрясения Тохоку 2011 года, Mw 9.1.

Для реконструкции параметров современного поля напряжений тихоокеанского побережья Камчатки применялся метод катакластического анализа разрывных нарушений. В качестве исходных данных использовались данные о механизмах очагов землетрясений. Обработка исходных сейсмологических данных производилась за 2015–2025 гг., в узлах сетки $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ в латеральном направлении для трех глубинных интервалов 0–30, 30–60, 60–120 км.

Результаты реконструкции напряжений, полученные в исследуемом регионе, позволили выявить характерные особенности пространственно-временного распределения параметров напряженного состояния. Для исследуемого региона характерно подобие тензоров напряжений и приращений сеймотектонических деформаций. Небольшая анизотропия отмечается только для участка земной коры вблизи сочленения Алеутского и Камчатского сегментов. По результатам анализа современного напряженного состояния выделены сеймотектонические области различного деформационного режима. Важная особенность поля напряжений связана с областью сопряжения Алеутской и Камчатской сейсмофокальных зон, именно здесь наблюдаются основные неоднородности поля напряжений. В области подготовки сильного землетрясения отмечены низкие значения относительного эффективного давления.

ОЦЕНКА РАССТАНОВКИ ПУНКТОВ ВРЕМЕННОЙ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОЙ СЕТИ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И МАКСИМАЛЬНОГО АЗИМУТАЛЬНОГО ПРОБЕЛА

С. Н. Понасенко

*Институт Нефтегазовой Геологии и Геофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия;
PonassenkoSN@ipgg.sbras.ru*

Работа направлена на повышение качества данных сейсмологической сети в западной части дельты реки Лена. Ключевыми оптимизируемыми параметрами являются чувствительность сети и максимальный азимутальный пробел между станциями. Для оценки различных сценариев расстановки станций анализировались средние значения этих метрик в исследуемом регионе. Основная задача планирования — максимизировать чувствительность при условии, что средний максимальный азимутальный пробел не превышает 180° . По результатам анализа текущей конфигурации было предложено демонтировать пункт «SML09» и перенести его оборудование в более подходящее место. Также разработан план развертывания дополнительных станций, который позволяет повысить среднюю чувствительность в области на 0.36. Согласно закону Гутенберга-Рихтера, это улучшение потенциально позволит регистрировать в два раза больше сейсмических событий.

ОТКЛИК НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ, СОПУТСТВУЮЩИЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЮ В ОКРУГЕ СИКАЙН 28 МАРТА 2025 Г., ПО ДАННЫМ ОБСЕРВАТОРИИ «МИХНЕВО»

С. А. Рябова^{1, 2}

¹ – *Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, г. Москва, Россия;
riabovasa@mail.ru*

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

В ходе настоящих исследований выполняется анализ удаленных аномалий в электрическом поле в приземном слое атмосферы, сопутствующих землетрясению магнитудой Mw 7,7, произошедшему 28 марта 2025 года в 12:50:54 UT в округе Сикайн (Мьянма), по данным Геофизической обсерватории «Михнево» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук и предлагается возможная причина возникновения таких аномалий.

Регистрация вариаций вертикальной компоненты напряженности электрического поля выполнялась на обсерватории «Михнево» измерителем напряженности электрического поля BOLTEK EFM-100, который был установлен вместо ИНЭП при модернизации обсерватории «Михнево». Следует отметить, что период рассматриваемого землетрясения характеризовался отсутствием значимых локальных возмущений атмосферного электрического поля, связанных с источниками природного и техногенного происхождения, а также значимых геомагнитных возмущений локального и глобального характера, что упростило выделение вызванных возмущений геофизических полей.

На обсерватории «Михнево» основные по амплитуде возмущения напряженности электрического поля, вызванные сейсмическим событием, представлены в целом в виде положительной бухты амплитудой ~43 В/м. Возможной причиной удаленных вариаций электрического поля в приземном слое атмосферы в период сильных землетрясений может быть интенсификация эманаций радона в районе наблюдений, обусловленная сейсмогравитационными колебаниями с последующей модуляцией концентрации радона и аэрозоля посредством внутренних атмосферных волн.

Экспериментальные исследования выполнены в рамках государственного задания ИДГ РАН «Преобразование геофизических полей как основной фактор межгеосферных взаимодействий» (№ 125012700798–8), интерпретация результатов выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН.

ПРИМЕНЕНИЕ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ И ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ЗАДАЧ СЕЙСМОТЕКТОНИКИ

А. А. Сенцов¹, А. О. Агибалов^{1,2}

¹ – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; alekssencov@yandex.ru*

² – *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

Работа посвящена проблеме повышения точности определения границ зон возникновения очагов землетрясений (ВОЗ), прежде всего, с моментной магнитудой ≥ 5.5 . Для ее решения предложен новый методический подход, апробированный на примерах нескольких сейсмоактивных регионов — острова Сахалин, Большого Кавказа и Алтае-Саянской области. Он заключается в расчете комплекса морфометрических параметров рельефа, информативных для понимания интенсивности и направленности новейших движений, обуславливающих сейсмичность. Обработка нескольких морфометрических схем с использованием инструментов нечеткой логики позволила рассчитать интегральный параметр, обозначенный как индекс неотектонической активности. С помощью компьютерного геодинамического моделирования оценены относительные величины горизонтальных напряжений. По повышенным значениям этих двух показателей выделены достаточно крупные сейсмоактивные участки. Сокращение их площади выполнено на основе данных о локализации эпицентров сейсмических событий и конфигурации активных разломов, что позволило рассмотреть такие области как зоны ВОЗ. Для из них по разным эмпирическим формулам оценена максимальная моментная магнитуда ожидаемого землетрясения.

Значимость полученного результата связана с его востребованностью для сейсмического районирования, поскольку площадные структуры (аналогичные выделенным нами зонам ВОЗ) служат одним из элементов линеаментно-доменно-фокальной модели, положенной в основу карт общего сейсмического районирования. Предложенный нами новый подход к оконтуриванию зон ВОЗ в значительной мере формализован, что снижает роль во многом субъективных экспертных оценок при их выделении.

ЛИНЕАМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ПО ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПРИРОДНЫХ КАНАЛОВ МИГРАЦИИ МЕТАНА

А. С. Силевич

Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г. Москва, Россия; Silavi23@ya.ru

В докладе представлены результаты исследований, направленных на выявление природных каналов миграции метана с использованием тектонофизического подхода на основе автоматизированного линеаментного (штрихового) анализа цифровой модели рельефа (ЦМР), построенной по данным высокодетальной аэрофотосъёмки с беспилотного летательного аппарата.

Исследования проведены на территории шахты им. С. М. Кирова (Кемеровская область, Кузбасс), характеризующейся высокой природной газоносностью и специфическими геологическими условиями. Район отличается развитой системой тектонических нарушений, представленных преимущественно разломами восточного простирания, которые играют роль естественных коллекторов и каналов миграции метана. Анализ ЦМР осуществлялся с помощью специализированного программного обеспечения LESSA, позволяющего выделять штрихи — локальные линейные элементы рельефа, соответствующие зонам повышенной трещиноватости и потенциальной миграции газов.

Сопоставление результатов штрихового анализа с инженерно-геологической картой подтвердило пространственное совпадение выявленных линейных структур с известными тектоническими разломами вдоль речной долины, что подчёркивает важность природных факторов в формировании метаноопасности региона. Установлено, что выявленные зоны повышенной плотности штрихов коррелируют с участками фактического проявления метана на поверхности.

Предлагаемая методика позволяет эффективно выявлять природные зоны миграции метана, основываясь на геологических и тектонофизических особенностях изучаемого района. Полученные результаты имеют большое значение для понимания механизма природной дегазации и могут быть использованы для прогнозирования газовых проявлений в регионах со сходными геологическими условиями.

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ПАЛЕО И ИСТОРИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ РАЙОНА ТОРУ-АЙГЫР, СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ

А. А. Стрельников

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

Иссык-Кульская впадина относится к одним из самых сейсмоактивных регионов: здесь с начала голоцена по данным архео и палеосейсмологии обнаружены многочисленные примеры сильной сейсмической активности. Также и в настоящее время здесь регистрируется большое количество как слабых, так и достаточно сильных землетрясений.

В 2025 году были проведены комплексные палеосейсмологические работы в Иссык-Кульской области Республики Кыргызстан, Северный Тянь-Шань. Целью работы было уточнения сейсмической опасности района Торун-Айгыр, расположенного в зоне активного Култорского разлома. Выполнены трашейные работы и исследования обнажений в зонах разломных уступов. Проведено послойное описание профилей с фиксацией фациальных характеристик отложений, взаимоотношений слоев; выявление сейсмогенного разрыва, определение типа и амплитуды смещения по нему, коллювиальных клиньев. Оценка магнитуд и интенсивности палеоземлетрясений проводилась на основе эмпирических зависимостей между ними и параметрами сейсмогенных разрывов [Wells, Coppersmith, 1994]. Проведен статистический анализ современной геодинамической активности северной прибрежной зоны оз. Иссык-Куль, в основу которого положены данные ГНСС и решения фокальных механизмов близлежащих очагов землетрясений.

Одним из важнейших результатов стало подтверждение опускания береговой линии на участке северо-западного побережья оз. Иссык-Куль в результате неизвестного древнего землетрясения.

Работа выполнена в рамках государственного задания лаборатории палеосейсмологии и палеогеодинамики Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН: «Структуры Земной коры в различных геодинамических обстановках, параметризация и пространственно-временное распределение связанных с ними сильных землетрясений FMWU-2025–0039» (Руководитель темы А. М. Корженков).

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ПАЛЕО И ИСТОРИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ТАЛАССКОГО АЛА-ТОО, ЗАПАДНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ

А. А. Стрельников

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

Западный Тянь-Шань относится к одним из самых сейсмоактивных регионов: здесь с начала голоцена по палеосейсмологическим данным обнаружены многочисленные примеры сильной сейсмической активности прошлого. В настоящее время здесь регистрируется большое количество как слабых, так и достаточно сильных землетрясений. Одним из сильных событий было Чаткальское землетрясение 1946 года ($M = 7.5$; $I_0 = 9-10$ баллов).

В 2025 году были проведены комплексные палеосейсмологические работы в Таласской области Республики Кыргызстан, Западного Тянь-Шаня. Целью работы было уточнения сейсмической опасности в районе Таласского Ала-Тоо, расположенного в зоне активных Таласо-Ферганского, Атойнокского и Западнокарасуйского разломов. Выполнены трашейные работы и исследования обнажений в зонах разломных уступов. Проведено послойное описание профилей с фиксацией фациальных характеристик отложений, взаимоотношений слоев; выявление сейсмогенного разрыва, определение типа и амплитуды смещения по нему, коллювиальных клиньев. Оценка магнитуд и интенсивности палеоземлетрясений проводилась на основе эмпирических зависимостей между ними и параметрами сейсмогенных разрывов [Wells, Coppersmith, 1994]. Проведен статистический анализ современной геодинамической активности предгорных и внутригорных зон Таласского Ала-Тоо, в основу которого положены данные ГНСС и решения фокальных механизмов близлежащих очагов землетрясений.

Работа выполнена в рамках государственного задания лаборатории палеосейсмологии и палеогеодинамики Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН: «Структуры Земной коры в различных геодинамических обстановках, параметризация и пространственно-временное распределение связанных с ними сильных землетрясений FMWU-2025–0039» (Руководитель темы А. М. Корженков).

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РААХЕ-ЛАДОЖСКОЙ ЗОНЫ В СЕВЕРНОМ ПРИЛАДОЖЬЕ

Я. В. Таран¹, И. М. Алешин¹, К. И. Холодков¹, Ф. В. Передерин¹

¹ – *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; taran@ifz.*

Раахе-Ладожская (Ладожско-Ботническая) шовная зона в Юго-Восточной Фенноскандии разделяет крупные тектонические блоки – архейский Карельский кратон и протерозойский Свекофеннский аккреционный ороген. Эта зона протягивается на длину около 1000 км от Ладожского озера до каледонских надвигов на северо-западе щита. По данным ГСЗ считается, что она представляет собой погружение коры с северо-востока на юго-запад с амплитудой смещения поверхности М около 3–5 км. В пределах Северного Приладожья также отдельно выделяется Мейерская надвиговая зона – Юго-восточный фрагмент Раахе-Ладожской зоны, хорошо обнажённый вдоль береговой линии Ладожского озера. Зона прослежена в субширотном направлении не менее чем на 40 км, её ширина – около 20 км. Непосредственно к контактовой зоне между Карельским и Свекофеннским геоблокам приурочена Янисъярвинская разломная система, но в зоне сочленения также присутствуют и другие тектонические разломы, разделяющие геоблоки третьего порядка.

Одной из самых значимых геофизических аномалий, приуроченных к этим структурам, является Ладожская аномалия электропроводности. История её изучения длится с середины 20 века. В 2014–2020 годах была получена модель глубинного геоэлектрического строения, построенная по данным профиля МТ-МВ зондирований Выборг-Суоярви, полученная в результате совместной работы сотрудников ИФЗ РАН и МГУ имени М. В. Ломоносова. Позднее по ней совместно с данными других геофизических исследований М. В. Минцем была создана объемная модель глубинного строения Свекофеннского орогена.

Для уточнения строения приповерхностных структур вдоль профиля проводятся и другие геофизические исследования. В 2025 году новым этапом должны стать маловысотные аэромагнитные исследования с БВС, выполненные сотрудниками ИФЗ РАН.

ВЗАИМОСВЯЗЬ НЕОТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ И ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ТЕРРИТОРИИ ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАВКАЗА

В. А. Тимошина

Кубанский государственный университет, г Краснодар, Россия; valeriatimosina708@gmail.com

В работе рассматривается взаимосвязь между распределением тектонических напряжений и активизацией опасных геологических процессов на территории Черноморского побережья Северо-Западного Кавказа. Исследуемая территория характеризуется сложным геологическим, тектоническим строением и высокой степенью развития гравитационных процессов. Исследование фокусируется на анализе неотектонических движений, которые создают напряжения в земной коре и влияют на устойчивость склонов и горных массивов. Подробно рассматриваются роль разрывных нарушений и зон повышенной трещиноватости в формировании очагов деформаций, способствующих развитию оползневых и обвальных процессов.

В основу работы легли данные реконструкции напряженного состояния с помощью структурно-геоморфологического метода Л. А. Сим с использованием программного обеспечения SimSGM. В качестве материала для проведения реконструкции были выбраны: схема неотектонического районирования по С. А. Несмеянову и схема геодинамического районирования по Т. Н Куропаткиной.

Выявление зон, подверженных опасным геологическим процессам, осуществлялось на основе анализа дешифрирования космоснимков и материалах, полученных в результате полевых наблюдений.

Корреляция между изменением сдвиговых напряжений и частотой проявления опасных геологических процессов носит слабopоложительный характер. В результате работы получены реконструкции на различные участки территории Черноморского побережья Северо-Западного Кавказа, а также сводные корреляционные схемы. Важнейшим аспектом при подготовке выводов являлось рассмотрение влияния гидрометеорологических факторов, таких как интенсивные осадки, на активизацию этих процессов в условиях повышенной тектонической активности.

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ, СВЯЗАННЫХ С СЕРИЕЙ СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НАЧАЛА XXI В. В ЧИЛИ

Н. С. Щевьёва

Институт океанологии им. П. П. Шишова РАН, г. Москва, Россия; shchevyeva.ns@ocean.ru

Работа посвящена изучению пространственно-временных вариаций деформаций земной поверхности Чилийского побережья, связанных с возникновением здесь серии из трех сильнейших землетрясений с $M > 8$. Исходными данными для исследования послужили многолетние спутниковые геодезические измерения на территории Чили и Аргентины, а также региональные сейсмологические и геологические данные.

Важной частью работы является моделирование распределенной сейсмической подвижки в очагах трех землетрясений с $M > 8$: Мауле 27 февраля 2010 г. ($M_w = 8.8$), Икике 1 апреля 2014 г. ($M_w = 8.1$) и Ильяпель 16 сентября 2015 г. ($M_w = 8.3$), произошедших в Чилийской зоне субдукции. Моделирование поверхности сейсморазрыва осуществлялось двумя способами: для однородного упругого изотропного полупространства и для слоистого упругого сферически-симметричного пространства. В работе проведён сравнительный анализ этих подходов и показано, что точность восстановления сейсмической подвижки в очаге землетрясения напрямую зависит от выбранной модели Земли.

Кроме того, по данным непрерывных ГНСС-измерений были рассчитаны поля скорости плоской деформации до и после исследуемых землетрясений. Установлено, что в период, предшествующий землетрясению, вблизи его очага наблюдается рост скорости деформации, в то время как в период, следующий за землетрясением, наблюдается уменьшение скоростей деформации в ближайшей окрестности его очага, что отражает постепенную релаксацию накопленных напряжений. Очаги же землетрясений формируются вблизи области выраженных градиентов полей величин, отражающих деформации земной поверхности.

