

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Сибирское отделение
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт земной коры

РАЗЛОМООБРАЗОВАНИЕ В ЛИТОСФЕРЕ И СОПУТСТВУЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ: ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЙ АСПЕКТ

Тезисы докладов
Всероссийской конференции, посвященной 75-летию
ИЗК СО РАН, 45-летию лаборатории тектонофизики,
90-летию со дня рождения профессора С. И. Шермана
Иркутск, 16–21 сентября 2024 г.



УДК 551.24
ББК 26.3
P17

Рекомендовано к печати
ученым советом ФГБУН ИЗК СО РАН
Протокол № 6 от 03.09.2024

Ответственный редактор
доктор геолого-минералогических наук К. Ж. Семинский

P17

Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический аспект : тезисы докладов Всероссийской конференции, посвященной 75-летию ИЗК СО РАН, 45-летию лаборатории тектонофизики, 90-летию со дня рождения профессора С. И. Шермана. Иркутск, 16–21 сентября 2024 г. / ФГБУН ИЗК СО РАН ; отв. ред. К. Ж. Семинский. – Иркутск : Издательство ИГУ, 2024. – 144 с.

ISBN 978-5-9624-2306-7

Представлены современные исследования в области тектонофизики разломообразования и важных в практическом отношении процессов, сопутствующих деструкции литосферы. Рассматриваются вопросы механизмов формирования иерархии разломно-блоковых структур, оценки тектонофизических условий разломообразования на разных глубинах, эволюции поля напряжений при формировании сложных тектонических структур, проблемы избирательной активизации разломных сетей при различных режимах деформирования с акцентом на результатах физического и математического моделирования. Проблематика сопутствующих процессов представлена разработками в области взаимосвязи разломообразования и сейсмичности, реконструкции напряженно-деформированного состояния осадочного чехла на месторождениях углеводородов, выявления факторов структурного контроля оруденения и особенностей флюидного режима разломных зон.

Предназначено для широкого круга специалистов в области тектонофизики, геомеханики, геодинамики, структурной геологии, геофизики, рудообразования, гидрогеологии и инженерной геологии, которые занимаются исследованием разломной структуры литосферы и связанных с ее формированием сопутствующих процессов.

УДК 551.24
ББК 26.3

ISBN 978-5-9624-2306-7

© ФГБУН ИЗК СО РАН, 2024

Содержание

От оргкомитета	9
Основные даты жизни и деятельности профессора Семена Иойновича Шермана	12
Аржанникова А. В., Аржанников С. Г., Чеботарев А. А., Трифонов В. Г., Соколов С. А. Скорости смещения и возраст сдви- говых деформаций Саяно-Тувинского нагорья	16
Атабаев Д. Х., Абдуллаев Н. К. Глубинное строение Южного Узбекистана по данным МОВЗ	17
Атабеков И. У., Садыков Ю. М. Геодинамика Западно-Тянь- Шаньской микроплиты	19
Бабичев А. В., Полянский О. П., Ножкин А. Д., Сокол Э. В. Плавление в разломах: петрологические свидетельства, реологиче- ские параметры и модель формирования псевдотахилитов	20
Беседина А. Н., Тубанов Ц. А. Особенности микросейсмиче- ского шума озера Байкал	22
Бобров А. А., Декабрёв И. К. Исследование карстовых пустот методом электротомографии (на примере пещеры Подпихтарной, Прибайкалье)	23
Богомолов Л. М., Каменев П. А., Дегтярев В. А. О результа- тах сопоставления кинематики разрывных нарушений Сахалина на основе геологических и сейсмологических методов	25
Бызов Л. М. Моделирование современных геодинамических процессов: оценка возможностей программы CHLD	26
Валуйский А. Ю. Обработка данных, полученных методом электротомографии	27
Ган-Очир Ж. Разломно-блоковая структура территории монголии и структурный контроль оруденения	28
Герман В. И., Добрынина А. А., Чечельницкий В. В. Соот- ношение магнитуд от различных сейсмологических агентств и зна- чений энергетического класса для Байкальского региона	30
Голубев В. А. Влияние оледенений на гидротермальные систе- мы Прибайкалья	31
Гордеев Н. А. Применение БВС в тектонофизике	33
Гордеев Н. А., Сим Л. А., Тверитинова Т. Ю., Сычева Н. А., Березин О. А. Новейшая тектоника и геология Горного Алтая и сопредельных территорий	34
Данилова Е. А. Свердловская радиально-концентрическая структура – центр аккумуляции углеводородов	36

Добрынина А. А., Саньков В. А. Вариации поглощения сейсмических волн в очаговых областях сильных землетрясений	37
Дубиня Н. В., Тихоцкий С. А. Флюидопроводимость естественных трещин сдвига в приразломных зонах по результатам геофизических наблюдений и теоретического анализа	39
Дядьков П. Г., Козлова М. П., Гилева Н. А. О процессе подготовки Кударинского землетрясения 09.12.2020, $M_w = 5,5$	40
Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В., Ешкунова И. Ф., Шевкунова Е. В. Детальные исследования объемной структуры сейсмически активизированных разломов по афтершоковым процессам крупных землетрясений и роевым последовательностям	41
Калинин Ю. А., Гладков А. С., Наумов Е. А., Сухоруков В. П., Жимулев Ф. И. Структурные факторы контроля золотого оруденения рудного поля Райгородок (Северный Казахстан)	43
Каменев П. А. О тектонофизических исследованиях на о. Сахалин	44
Каримова Ф. Б., Джуманиязов Д. И. Центральный тектонический блок Алмалыка – Каульдинское рудное поле (Кураминский горный район)	45
Копылов М. И., Бронников А. К. Развитие тектоники, магматизма и рудной минерализации в пределах Удско-Мургаляского вулканического пояса	47
Копылов М. И., Бронников А. К. Фрактальная дискретность литосферы юга Дальневосточного региона	48
Корбутяк А. Н., Фролова Н. С. Аналоговое физическое моделирование сдвиговых деформаций на севере Западно-Сибирской плиты	50
Кочарян Г. Г. Трение в разломных зонах. Влияние на эффекты излучения сейсмических колебаний и разломообразование	51
Кузьмин Д. К. Оценка напряженного состояния разломных зон в нефтегазоносных регионах	53
Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика индуцированных и опасных разломов	54
Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б., Минеев А. Л., Полякова Е. В. Дегазация тектонических узлов севера Русской плиты	56
Лебедева М. А., Саньков В. А. Опыт применения интерферометрии в области косейсмических и постсейсмических деформаций Хубсугульского землетрясения (12.01.2021, $M_w = 6,7$)	57
Леонов М. Г. Геодинамическая природа провинций бассейнов и хребтов и рифтогенез	59
Лунина О. В., Гладков А. А. Активное разрывообразование и сопутствующие процессы на западном побережье оз. Байкал	60

Магомедов Р. А. Разломно-блоковая структура Восточного Кавказа и сейсмический процесс	62
Малышкин Т. Е., Гордеев Н. А. Перспективы применения данных космических съемок Земли с целью проведения работ по сейсморайонированию территорий	63
Маринин А. В. Обзор результатов полевых тектонофизических исследований на Северном Тянь-Шане и Горном Алтае	64
Меркулова Т. В., Гильманова Г. З. Особенности разломной тектоники и сейсмичности Буреинского орогена	66
Митрохин А. Н., Уткин В. П., Неволин П. Л. Особенности пространственного распределения магния в Комсомольском рудном районе (на уровне кларковых содержаний): геохимические и структурно-динамические аспекты	67
Молчанов А. Б., Гордеев Н. А. Предсказание разрывных нарушений на GPU по космоснимкам	69
Мягков Д. С. Математическое моделирование нагружения и деформации осадочного чехла над активными разломами фундамента в приложении к задачам тектонофизики	70
Мягков Д. С., Ребецкий Ю. Л. Магматизм как ключевой фактор формирования надлитостатических напряжений Сибирского кратона и Центрально-Азиатского складчатого пояса	72
Неведрова Н. Н., Шалагинов А. М., Санчаа А. М., Шапаренко И. О., Бабушкин С. М. Разломные структуры и мониторинг по данным электроразведки в зоне сейсмической активизации Горловской впадины	73
Неволин П. Л., Митрохин А. Н., Уткин В. П. Динамика межблоковых зон и складчатости в Приморье	74
Носкова Е. С., Спиридонов В. А., Агафонова Г. В. Новые данные о строении зоны сочленения Байкитской антеклизы и Курейской синеклизы в связи с уточнением нефтегазогеологического районирования	76
Нуртаев Б. С., Цай О. Г. Применение дискриминантного анализа для оценки сейсмичности (территория Республики Узбекистан)	77
Остапчук А. А. Сейсмичность, контролируемая реологией тектонических разломов	78
Павлов С. Х. Флюидогеодинамика и ее связь с тектоникой: формирование минеральных «столбов» в осадочных бассейнах	80
Пантелеев И. А., Борняков С. А., Вшивков А. Н., Окунев В. И., Новиков В. А. Особенности формирования и развития разломных зон на лабораторном масштабе: подходы, методы, результаты	81

Пантелеев И. А., Ляховский В., Шалев Э. Пороупругий отклик геосреды на прохождение сейсмических волн как инструмент оценки ориентации трещиноватости в районе активной разломной зоны	83
Перевалова Н. П., Добрынина А. А., Саньков В. А. Некоторые эффекты сейсмических процессов в атмосфере Земли	84
Радзиминович Н. А., Иванушкин Е. Д. Сильнейшие афтершоки в афтершоковых последовательностях Байкальской рифтовой зоны	86
Радзиминович Н. А., Саньков В. А. Сопоставление эпицентральных зон землетрясений и разломов	87
Рассказов С. В., Чувашова И. С., Чебыкин Е. П., Ильесова А. М. Импульсная скользящая активизация литосферы от Витимо-Удоканской зоны угловой горячей трансензии к впадинам оз. Байкал	88
Рахматуллаева Ш. Д., Туляганова Н. Ш. Напряженно-деформированное состояние пород месторождения Марджанбулак при рудообразовании	90
Ребецкий Ю. Л. Закономерности формирования коровых напряжений в континентальных орогенах и активных континентальных окраинах	92
Ребецкий Ю. Л. О двух механизмах генезиса напряжений высокого горизонтального сжатия в коре континентальных орогенов	93
Родкин М. В., Андреева М. Ю., Прохорова Т. В., Рукавишников Т. А. Анализ взаимного расположения разломов, землетрясений и месторождений углеводородов на примере ряда регионов	94
Ружич В. В., Левина Е. А. О выяснении механизмов возникновения заблокированных сегментов разломов для совершенствования среднесрочного прогноза землетрясений и уточнения сейсмической опасности	96
Санчаа А. М., Неведрова Н. Н., Кузина З. Я. Разломно-блоковое строение Уймонской впадины Горного Алтая по данным геоэлектрики	97
Саньков В. А., Лухнев А. В., Мирошниченко А. И., Ашурков С. В., Саньков А. В., Добрынина А. А., Парфеев А. В., Ефимов Е. Ю. Тектонофизические закономерности современной геодинамики Монголо-Сибирского региона по данным ГНСС измерений	99
Свалова В. Б. Сейсмические процессы в разломно-блоковой структуре литосферы Анатолийского региона	100
Свечеревский А. Д., Устинов С. А. Реконструкция параметров поля напряжений-деформаций на основе мультимасштабного подхода от регионального до микроуровня на примере Обручевской системы разломов Байкальской рифтовой зоны	102

Семи́нский А. К., Семи́нский К. Ж. Разработка комплексного подхода к выявлению эманационного отклика сейсмических событий в Байкальском регионе	103
Сим Л. А. Поля напряжений и разломная тектоника месторождений нефти и газа	105
Соловицкий А. Н. О региональных закономерностях сейсмичности в Кузбассе	106
Стефанов Ю. П. Численное моделирование формирования зон необратимой деформации и разломообразования в земной коре	108
Стром А. Л. Волнообразный характер деформаций вдоль сдвиговых сейсмогенных разрывов – проявление фундаментальных особенностей процесса разрывообразования	109
Суворов В. Д., Тубанов Ц. А., Гилева Н. А. Пространственно неоднородная структура области распределения афтершоков Култукского землетрясения 2008 года с $M_W = 6,3$ на Байкале	111
Татаурова А. А., Стефанов Ю. П. Напряженно-деформированное состояние упругопластичного прямоугольного массива при сжатии	112
Тверитинова Т. Ю. Проявление на позднеальпийском этапе кинематогенных полей напряжений в разновозрастных орогенах Евразии	114
Тимофеев В. Ю., Ардюков Д. Г., Валитов М. Г., Тимофеев А. В. Структурные границы и современные смещения и деформации	115
Тубанов Ц. А., Беседина А. Н., Кишкина С. Б., Радзиминович Н. А. Исследование сейсмичности центральной части Байкальского рифта. Обзор проблем и новых подходов	117
Турсунметов Р. А., Тё В. С., Хасанбаев Х. Ф., Урунбаев О. Ш. Тектонофизические аспекты изучения формирования урановых месторождений гидрогенного типа в свете современной геодинамики (на примере Центрально-Кызылкумской урановорудной провинции Узбекистана)	118
Умурзаков Р. А. Разломно-блоковые деформации и поле тектонических напряжений юго-западных отрогов Гиссара	120
Устинов С. А., Свечеревский А. Д., Чепчугов А. М., Кочкин И. А., Петров В. А. Тектонофизический подход к интерпретации линейментов для прогноза рудообразующих систем на примере Туоюканского урановорудного узла (Мамско-Чуйский район, Иркутская область)	121
Фролова Н. С., Арешин Н. А. Роль аналогового моделирования в изучении структурообразования Баимской рудной зоны (Западная Чукотка)	123
Хамидов Л. А., Анварова С. Г., Жабборов У. Ч. Распределение землетрясений в разломах, близких к Чарвакскому водохранилищу	124

Хамидов Л. А., Артиков Ф. Р., Ганиева Б. Р. Плотности распределения локальных землетрясений вокруг тектонических структур в зоне влияния Тупалангского водохранилища	126
Хритова М. А., Мордвинова В. В., Кобелева Е. А., Кобелев М. М. Отражение разломных зон полуострова Камчатка в его глубинной скоростной структуре	127
Чеботарев А. А., Аржанников С. Г., Аржанникова А. В., Ritz J.-F., Авагян А. В. Новые палеосейсмические данные о голоценовой сейсмической активности в восточной части Тункинского разлома (юго-западный сегмент Байкальского рифта)	129
Черемных А. В., Декабрёв И. К., Черемных А. С. Зонно-блоковая структура и тектонические напряжения Прибайкальской окраины Сибирского кратона	130
Черных А. А., Буддо И. В., Шелохов И. А. Опыт применения комплекса геофизических методов для выделения ослабленных зон и разломов в Арктике	132
Шапаренко И. О., Неведрова Н. Н. Изучение строения разломных зон Горного Алтая методом электротомографии	133
Шашкеева Л. П., Буддо И. В., Шелохов И. А. Первые результаты изучения флюидонасыщенных разломных зон комплексом современных геофизических методов на восточном побережье озера Байкал	135
Яковлев Ф. Л. Структура, история развития и амплитуды смещения крупнейших разломов Альпийского Большого Кавказа по данным сбалансированной модели складчатого осадочного чехла	136
Javkhlanbold Dorjsuren. Geological Evolution of the Hadaasan Metamorphic Core Complex	138
Mart Y. Oceanic Core Complexes: Is Subduction Along Accreting Ridge – Transform Fault Intersections Possible?	139
Yanshuang Guo, Yan-Qun Zhuo, Peixun Liu, Shunyun Chen, Liqiang Liu, Jin Ma. Development of Multi-Physical Parameter Observation and Fault Sub-Instability Research	141
Lifeng Wang, Shiqing Xu, Yanqun Zhuo, Peixun Liu, Shengli Ma. Unraveling the Roles of Fault Asperities Over Earthquake Cycles	142
Lu Yao, Wei Feng, Weifeng Qin, Gang Song, Shengli Ma, Giulio Di Toro, Toshihiko Shimamoto. Large-Displacement Frictional Properties of Fault under Hydrothermal Conditions	143
Yan-Qun Zhuo, Peixun Liu, Yanshuang Guo, Shunyun Chen. Laboratory Study on the Accelerated Propagation of Weakening Zones on a Heterogeneous Fault	144

От оргкомитета

В сборнике представлены тезисы докладов Всероссийской конференции с участием приглашенных исследователей из других стран «Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический аспект», посвященной 75-летию Института земной коры СО РАН, 45-летию лаборатории тектонофизики и 90-летию со дня рождения ее организатора, профессора С. И. Шермана.

Институт земной коры СО РАН (ИЗК СО РАН) был организован в июле 1949 г. и стал одним из первых научных учреждений, с создания которых начал свою плодотворную деятельность Восточно-Сибирский филиал АН СССР. В настоящее время это комплексный научно-исследовательский институт, занимающий в Восточной Сибири ключевые позиции в области фундаментальных геологических исследований и связанных с ними прикладных научно-исследовательских разработок, главными направлениями которого являются:

- 1) современная эндо- и экзогеодинамика; геологическая среда и сейсмический процесс; ресурсы, динамика подземных вод и геоэкология;
- 2) внутреннее строение, палеогеодинамика, эндогенные процессы и флюидодинамика континентальной литосферы.

В разработке первого направления принимает активное участие лаборатория тектонофизики, являющаяся единственным научным коллективом восточнее Урала, в котором реализуется полный комплекс тектонофизических методов. Основные направления исследований лаборатории состоят:

- в изучении иерархии полей напряжений и разломно-блоковой структуры литосферы для выявления тектонофизических закономерностей деструкции и мониторинга процесса разрывообразования в отдельных регионах Центральной Азии, различающихся режимами геодинамического развития;
- изучении механизмов деструкции литосферы в разнотипных динамических режимах методами тектонофизического моделирования;
- разработке теоретических моделей деструкции верхней части литосферы на базе тектонофизического анализа геолого-структурных, геофизических и экспериментальных материалов;
- изучении закономерностей проявления сейсмической и эманиционной активности, локализации алмазоносных кимберлитов и продуктивных залежей углеводородов, контролируемых разломными зонами земной коры.

Лаборатория была организована 29 ноября 1979 г. по инициативе доктора геол.-минерал. наук С. И. Шермана, который руководил ею в последующие 25 лет. Таким образом, С. И. Шерман является основателем иркутской тектонофизической школы, которая включает 19 кандидатов и 5 докторов наук, являющихся его непосредственными учениками, а также десятки специалистов, которые в настоящее время развивают тектонофизическое направление исследований в Институте земной коры СО РАН и других научных и производственных учреждениях Сибири.

Семен Иойнович Шерман родился 30 апреля 1934 г. Окончил Иркутский горно-металлургический институт в 1958 г. и начиная с 1959 г. 57 лет проработал в Институте земной коры СО РАН. Вместе с соавторами его перу принадлежат более 450 научных работ, включая 16 монографий, несколько брошюр, в том числе более 60 статей и две монографии, изданные за рубежом. С. И. Шерман был и остается признанным специалистом в одной из самых актуальных областей геодинамики – тектонофизике разломообразования в литосфере Земли, ее напряженного состояния, геодинамической активности и сейсмичности.

Кроме создания лаборатории тектонофизики С. И. Шерман в 2010 г. принял активное участие в организации и систематическом издании в ИЗК СО РАН международного электронного журнала «Геодинамика и тектонофизика» (2010 г.). Он принимал деятельное участие в проведении в ИЗК СО РАН многих научных форумов, посвященных проблемам разломообразования в земной коре, был организатором нескольких тектонофизических совещаний.

Всероссийская конференция «Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический аспект» 2024 г. является уже шестым научным форумом, организованным Институтом земной коры СО РАН и посвященным тектонофизике разломообразования в литосфере. Предыдущие конференции (1990, 2003, 2009, 2014, 2021 гг.) прошли успешно и отличались всесторонним обсуждением фундаментальных проблем тектонофизики, а также широким охватом специалистов, представляющих главные центры современных исследований в данной области.

В рамках конференции освещаются основные направления исследований в двух главных областях тектонофизики. Первое объединяет фундаментальные разработки по актуальным проблемам механизмов формирования иерархии разломно-блоковых структур литосферы, вопросам определения тектонофизических условий разломообразования на разных глубинах, эволюции поля напряжений при формировании сложных тектонических структур, проблемам избирательной активизации

ции разломных сетей при различных режимах деформирования с акцентом на результатах физического и математического моделирования. Второе объединяет разработки, связанные с решением проблем взаимосвязи разломообразования и сейсмичности, напряженно-деформированного состояния осадочного чехла на месторождениях углеводородов, структурного контроля оруденения, флюидного режима разломных зон, влияния разломно-блоковой структуры земной коры на состояние подземной гидросферы.

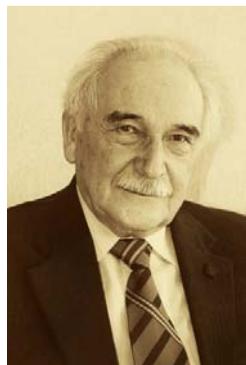
Особенностью тектонофизической конференции является акцентирование внимания специалистов разного профиля на проблеме разработки комплексных моделей межблоковых зон, в основе которых лежат ключевые закономерности разломного строения, а содержательную часть составляют обусловленные им особенности сейсмической, флюидной, эманационной и других форм активности. Подобные модели являются современным теоретическим обоснованием создания разнотипных прикладных технологий, направленных на прогноз сейсмической активности, повышение эффективности разведки месторождений углеводородов, оценку радоноопасности территорий и характера проявления опасных инженерно-геологических процессов и явлений. Это соответствует Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации в той ее части, которая направлена на повышение возможностей «эффективного ответа Российского общества на большие вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий, социальных институтов на современном этапе глобального развития»¹.

В целом научная конференция объединяет специалистов из смежных областей геологии и геофизики для обсуждения тектонофизических закономерностей разломообразования и процессов, сопровождающих деструкцию литосферы на разных иерархических уровнях.

*Заведующий лабораторией тектонофизики ИЗК СО РАН,
доктор геол.-минерал. наук
К. Ж. Семинский*

¹ О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации : указ Президента РФ от 28 февр. 2024 г. № 145 // Гарант : справочная правовая система.

*Доктор геолого-минералогических наук,
профессор, академик РАЕН,
заслуженный деятель науки РФ,
заслуженный деятель науки Республики Бурятия,
почетный работник науки и техники РФ,
лауреат премии Совета министров СССР*



Основные даты жизни и деятельности профессора Семена Ийновича Шермана

1934 г. (30 апреля) – родился в пос. Лугины (Украина, Житомирская обл.).

1951 г. – окончил среднюю школу в г. Житомире.

1953 г. – поступил на геологоразведочный факультет Иркутского горно-металлургического института (в настоящее время Иркутский национальный исследовательский технический университет).

1958 г. – с отличием окончил Иркутский горно-металлургический институт по специальности «Геологическая съемка и разведка месторождений полезных ископаемых» с присвоением квалификации горного инженера-геолога.

1959 г. – принят на должность младшего научного сотрудника в Институт геологии Восточно-Сибирского филиала АН СССР (позже Институт земной коры СО РАН, ныне ФГБУН ИЗК СО РАН).

1963 г. – переведен на должность научного сотрудника.

1964 г. – присуждена ученая степень кандидата геолого-минералогических наук за защиту диссертации «Тектоническая трещиноватость Слюдянского флогопитоносного поля (Прибайкалье)».

1968 г. – переведен на должность старшего научного сотрудника

1977 г. – присуждена ученая степень доктора геолого-минералогических наук за защиту диссертации «Разломная тектоника Байкальской рифтовой зоны (тектонофизический анализ)».

1978–2009 гг. – работа по совместительству на геологоразведочном факультете в Иркутском государственном техническом университете в должности доцента, а с 1980 г. – профессора.

1979 г. – организовал лабораторию тектонофизики и в течение 25 лет был ее заведующим.

1992 г. – избран членом-корреспондентом Российской академии естественных наук.

1995 г. – избран действительным членом Российской академии естественных наук.

1998 г. – присуждена премия Совета министров СССР в области науки и техники.

2004 г. – переведен на должность главного научного сотрудника.

2004 г. – присвоены звания «Заслуженный деятель науки Российской Федерации» и «Заслуженный деятель науки Республики Бурятия».

2010 г. – принял активное участие в организации международного электронного журнала Института земной коры СО РАН «Геодинамика и тектонофизика».

2014 г. – присвоено звание «Почетный работник науки и техники Российской Федерации».

2017 г. (13 июля) – ушел из жизни в возрасте 83 лет.

В разное время С. И. Шерман был награжден медалями «За доблестный труд. В ознаменование 100-летия со дня рождения В. И. Ленина», «За строительство Байкало-Амурской магистрали», «Ветеран труда», бронзовой медалью ВДНХ СССР, серебряной медалью Оргкомитета Международного геологического конгресса (Москва, 1984 г.) за участие в подготовке полевых экскурсий конгресса по Прибайкалью, медалью СО РАН «Академик Коптюг», рядом почетных грамот Президиума АН СССР и Президиума СО РАН, дирекции ИЗК СО РАН, а также грамотой и премией губернатора Иркутской области.

Среди прямых учеников С. И. Шермана 5 докторов наук и 19 кандидатов наук, которые составляют основу иркутской тектонофизической школы.

Вместе с соавторами С. И. Шерман опубликовал более 450 научных работ, включая 16 монографий, несколько брошюр, более 60 статей и 2 монографии, изданные за рубежом.

Список монографических трудов профессора С. И. Шермана

Таблицы перевода числовых значений точек в проценты при составлении структурных диаграмм. – Иркутск : Тр. Вост.-Сиб. геол. ин-та, 1961. – Вып. 6. – 43 с.

Селевой паводок в г. Слюдянке на Байкале 20 июня 1960 г. – Москва : АН СССР, 1963. – 72 с. – Соавт.: И. Н. Иванов, О. Л. Рыбак, Б. И. Писарский и др.

Гидрогеология Прибайкалья. – Москва : Наука, 1968. – 170 с. – Соавт.: Е. В. Пиннекер, Б. И. Писарский, И. С. Ломоносов, Р. Я. Колдышева, Л. А. Диденко

Тектоника и вулканизм юго-западной части Байкальской рифтовой зоны. – Новосибирск : Наука, 1973. – 136 с. – Соавт.: М. Е. Медведев, В. В. Ружич, А. И. Киселев, А. Н. Шмотов.

Физические закономерности развития разломов земной коры. – Новосибирск : Наука, 1977. – 102 с.

Физические закономерности развития разломов земной коры. – Пекин, 1980. – 71 с. (на кит. яз.).

Методика изучения и опыт использования количественных параметров разрывов в структурно-геологических исследованиях. – Иркутск : Иркут. кн. изд-во, 1981–1981. – 62 с. – Соавт.: Р. М. Лобацкая.

Области динамического влияния разломов. – Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1983. – 112 с. – Соавт.: С. А. Борняков, В. Ю. Буддо.

Геология и сейсмичность зоны БАМ. Т. 3. Неотектоника. – Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1984. – 207 с. – Соавт.: К. Г. Леви, В. В. Ружич, В. А. Саньков, Ю. И. Днепровский, С. В. Рассказов.

Рекомендации по оценке ширины зон приразломных структурных изменений. – Иркутск : Вост.-Сиб. филиал СО АН СССР, 1985. – 42 с. – Соавт.: С. А. Борняков, В. Ю. Буддо.

Тектоника и эволюция земной коры Сибири. – Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1988. – 175 с. – Соавт.: К. В. Боголепов, А. К. Башарин, Н. А. Берзин и др.

Поля напряжений земной коры и геолого-структурные методы их изучения. – Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1989. – 157 с. – Соавт.: Ю. И. Днепровский.

Разломообразование в литосфере. Зоны сдвига. – Новосибирск : Наука, 1991. – 262 с. – Соавт.: К. Ж. Семинский, С. А. Борняков, В. Ю. Буддо, Р. М. Лобацкая, А. Н. Адамович, В. А. Трусков, А. А. Бабичев.

Разломообразование в литосфере. Зоны растяжения. – Новосибирск : Наука, 1992. – 227 с. – Соавт.: К. Ж. Семинский, С. А. Борняков, А. Н. Адамович, Р. М. Лобацкая, С. В. Лысак, К. Г. Леви.

Разломообразование в литосфере: зоны сжатия. – Новосибирск : Наука, 1994. – 257 с. – Соавт.: К. Ж. Семинский, С. А. Борняков, А. Н. Адамович, В. Ю. Буддо.

Applied geodynamic analysis // Musee Royal de l'Afrique Centrale Annales, Sciences Geologiques. – Tervuren, Belgique, 1995. – Vol. 100. – 133 p. – Соавт.: К. G. Levi.

Методика изучения и анализа количественных параметров разломов литосферы : метод. пособие. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2002. – 60 с.

Региональные шкалы сейсмической интенсивности. – Новосибирск : ГЕО, 2003. – 190 с. – Соавт.: Ю. А. Бержинский, В. А. Павленов, Ф. Ф. Аптикаев.

Северо-Муйский тоннель: из XX в XXI век. – Новосибирск : Наука, 2007. – 182 с. – Соавт.: Н. М. Быкова.

Молодые платформы Восточной окраины Евразии (Глубинное строение, условия формирования и металлогения) / науч. ред. А. П. Сорокин. – Владивосток : Дальнаука, 2013. – 366 с. – Соавт.: А. П. Сорокин, Ю. Ф. Малышев, Анд. А. Сорокин, В. С. Маркевич и др.

Сейсмический процесс и прогноз землетрясений: тектонофизическая концепция. – Новосибирск : ГЕО, 2014. – 350 с.

Избранные труды: тектонофизика разломообразования и сопутствующих процессов в литосфере. – Иркутск : Ин-т земной коры СО РАН, 2017. – 1476 с. (на CD-диске).

СКОРОСТИ СМЕЩЕНИЯ И ВОЗРАСТ СДВИГОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ САЯНО-ТУВИНСКОГО НАГОРЬЯ

А. В. Аржанникова^{1,2}, С. Г. Аржанников¹, А. А. Чеботарев¹,
В. Г. Трифионов², С. А. Соколов²

¹Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия, arzhan@crust.irk.ru

²Геологический институт РАН, Москва, Россия

Плиоцен-четвертичный этап формирования новейшей структуры Байкало-Монгольского региона связан с продвижением на север деформаций сжатия от Индо-Азиатской коллизии. Он начался 5 ± 3 млн л. н. и характеризуется блоковым поднятием горных хребтов Гобийского и Монгольского Алтая и Саянской горной области на границе с Сибирской платформой [Mongolian summits ... , 2007; Transpressional tectonics ... , 2007, De Apatite fission-track ... , 2008; Meso-Cenozoic building ... , 2014; и др.]. На фоне общего воздымания кора Байкало-Монгольского региона испытывает сдвиговые деформации. Крупные сдвиговые разломы, расположенные вдоль Гобийского Алтая (Богдинский разлом) и Монгольского Алтая (Фуюньский разлом), а также на севере Хангая (Болнайский и Цэцэрлэгский разломы), характеризуются проявлением в XX в. катастрофических землетрясений $M \geq 8$. Благодаря этим событиям разломы вдоль Гобийского и Монгольского Алтая, а также Болнайский разлом хорошо изучены с точки зрения морфотектоники, палеосейсмологии и геологических скоростей смещения. Данные по разломам к северу от Хангая остаются фрагментарными. Этот район, названный Саяно-Тувинским нагорьем [Гроссвальд, 1965], также имеет очень мало данных GPS-геодезии и остается белым пятном на карте скоростей современных деформаций.

На базе дистанционных и полевых морфотектонических и палеосейсмологических исследований были оценены скорости смещения и время начала активизации трех разломов: Саяно-Тувинского, Каахемского и Эрзино-Агардагского, представляющих собой фрагменты крупных левосторонних сдвиговых систем, пересекающих все Саяно-Тувинское нагорье до границы с Сибирской платформой. Было показано, что скорости левостороннего сдвига по изучаемым системам разломов распределяются примерно одинаково. Так, для Эрзино-Агардагского разлома скорость левосторонних смещений составляет $0,7-1,4$ мм/год. Для Саяно-Тувинского и Каахемского – минимальные границы горизонтальной скорости составляют $0,9\pm 0,1$ и $0,6\pm 0,1$ мм/год соответственно, что сопоставимо с минимальной скоростью по Эрзино-

Агардагскому разлому. Используя минимальные скорости смещений и оценки максимальных горизонтальных деформаций, мы рассчитали, что сдвиговые смещения по Саяно-Тувинскому и Каахемскому разломам начались не ранее 2,4 и 5 Ма назад соответственно. Для Эрзино-Агардагского разлома максимальный и минимальный возраст активизации сдвиговых смещений оценен в 2,1 и 1,1 Ма, что согласуется со временем активизации Болнайского левостороннего сдвига [Earthquake geology of ..., 2015].

Работы выполнены на средства Российского научного фонда в рамках проекта № 22-17-00049.

Литература

- Гросвальд М. Г. Развитие рельефа Саяно-Тувинского нагорья. М. : Наука, 1965. 166 с.
- Apatite fission-track thermochronology applied to the Chulyshman Plateau, Siberian Altai Region / J. De Grave, P. Van den Haute, M. M. Buslov [et al.] // Radiation Measurements. 2008. Vol. 43. P. 38–42.
- Earthquake geology of the Bulnay fault (Mongolia) / M. Rizza, J-F. Ritz, C. Prentice [et al.] // Bulletin of Seismological Society of America. 2015. Vol. 105, N 1. P. 72–93.
- Meso-Cenozoic building of the Northern Central Asian Orogenic Belt: Thermotectonic history of the Tuva Region / J. De Grave, E. De Pelsmaecker, F. I. Zhimulev [et al.] // Tectonophysics. 2014. Vol. 621. P. 44–59.
- Mongolian summits: An uplifted, flat, old but still preserved erosion surface / M. Jolivet, J.-F. Ritz, R. Vassallo [et al.] // Geology. 2007. Vol. 35, N 10. P. 871–874.
- Transpressional tectonics and stream terraces of the Gobi-Altay, Mongolia / R. Vassallo, J.-F. Ritz, R. Braucher [et al.] // Tectonics. 2007. Vol. 26, TC5013. P. 1–24.

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ ЮЖНОГО УЗБЕКИСТАНА ПО ДАННЫМ МОВЗ

Д. Х. Атабаев, Н. К. Абдуллаев

Национальный университет Узбекистана им. Мирзо Улугбека,
Ташкент, Узбекистан, atabaev_d@mail.ru

Земная кора Сурхандарьинской впадины изучалась региональными методами обменных волн землетрясений (МОВЗ), глубинным сейсмическим зондированием и корреляционным методом преломленных волн, причем как по отдельным локальным, так и региональным профилям.

Анализ регионального профиля V–V (Каттаган – Бандихан – Сарыасия), вытянутого субмеридионально вдоль осевой части Сурхандарьинской впадины на 156,4 км, позволил выделить две обменнообразующих границы. Первая из них, отождествляемая с поверхностью Мохо, зафиксирована в районе ПК 0 ($\Delta t_{p-ps} = 6,8$ с, $H = 55,9$ км). Северо-восточная часть границы (ПК 10–25) приподнята до глубины $H = 43$ км

($\Delta t_{p-ps} = 5,2$ с). Между ПК 14 и ПК 23 отмечается почти горизонтальное залегание ($\Delta t_{p-ps} = 5,4$ с, $H = 44,5$ км), а от 24-го до пикета 30 наблюдается незначительное погружение границы ($\Delta t_{p-ps} = 5,6$ с, $H = 46$ км). Волновая картина на пикетах 31–47 представлена хаотичной записью, что препятствует выделению обменнообразующих площадок. К северо-востоку от ПК 48 рассматриваемая обменнообразующая площадка плавно погружается от $\Delta t_{p-ps} = 5,3$ с ($H = 43,5$ км) до $\Delta t_{p-ps} = 6,0$ с ($H = 49$ км) [Атабаев, Абдуллаев, 2019]. Таким образом, предполагается наличие переходной зоны мантии (ПЗМ) в южной части профиля на отрезке между пикетами 0–12. Временная мощность в среднем составляет 0,3 с, что соответствует 2,5 км. В центральной и северной частях профиля по результатам интерпретации ПЗМ не проявляется, что может быть связано либо с резким сокращением ее мощности в этой части, либо с изменением петрофизических параметров и, как следствие, с изменением обменнообразующих свойств.

Вторая обменнообразующая граница приурочена к верхней структурной поверхности нижней коры; прослеживается на временах $\Delta t_{p-ps} = 3,8$ с ($H \approx 25$ км; ПК 0). На северо-востоке в районе ПК 19 граница погружается до глубины 27 км ($\Delta t_{p-ps} = 4,1$ с). Так, в частности, по линии пикетов 39–45 наблюдается локальное поднятие. Данная обменнообразующая граница прослеживается на глубинах $H = 27$ –28 км ($\Delta t_{p-ps} = 4,05$ –4,15 с). Вышезалегающая обменнообразующая площадка приурочена к поверхности фундамента и тяготеет к временному интервалу 1,5 с (ПК 15), 2,3 с (ПК 58), что соответствует глубинам $H = 6,6$ км (ПК 15), $H = 10,5$ км (ПК 58). Она прослеживается спорадически. Например, в районе пикетов 9–13 и 42–54 ось синфазности не просматривается, что, вероятно, связано с Южно-Сурхандарьинским разломом. Необходимо заметить, что участок, примыкающий к периферийной части структуры Баташ (ПК 42–54), приподнят по сравнению с его южным продолжением.

Таким образом, в итоге интерпретации и анализа временных и сейсмогеологических разрезов МОВЗ на профиле V–V (пикеты 31–47) выделен участок проявления мантийного диапира (плюма), прорывающего поверхность Мохо. Характерной особенностью его положения является распространение вверх по восстанию в северном направлении.

Литература

Атабаев Д. Х., Абдуллаев Н. К. Региональные сейсмологические наблюдения МОВЗ вдоль Профиля II-II на территории Республики Узбекистан // Современные технологии изучения и освоения недр Евразии : сб. тр. Междунар. геол.-геофиз. конф. «ГеоЕвразия-2019». М., 2019. С. 18–22.

ГЕОДИНАМИКА ЗАПАДНО-ТЯНЬ-ШАНЬСКОЙ МИКРОПЛИТЫ

И. У. Атабеков, Ю. М. Садыков

Институт сейсмологии АН РУз, Ташкент, Узбекистан,
atabekovi@mail.ru

На основе корреляции новейших и современных движений составлена карта современной геодинамики региона Средней Азии, включающего Западно-Тянь-Шаньскую микроплиту. На карте введены региональные разломы, активность которых доказана сейсмологическими, геологическими, космогеодезическими и другими данными. Большинство из разломов, характеризуясь определенной геоморфологической выраженностью, выполняют структурно-контролирующую роль. Зоны, разграничивающие блоки с высокими и низкими значениями современных движений, совпадают с активными разломами, отличающимися высокими тектоническими напряжениями. Они характеризуются высоким сейсмотектоническим потенциалом, что неоднократно подтверждалось возникновением разрушительных и сильных землетрясений. Большинство активных разломов или их фрагментов в той или иной степени отражаются в рисунке изолиний, а отдельные отрезки разграничивают территории с различным знаком вертикальных движений. Для анализа кинематики тектонических движений проведено математическое моделирование напряженного состояния земной коры рассматриваемого региона с помощью уравнения Навье – Стокса в предположении, что данное состояние является следствием столкновения Евразийской с Индийской и Арабской плитами. Трехмерные уравнения усреднены с учетом рельефа и границы Мохо. Усреднение уравнения неразрывности позволяет получить вертикальные компоненты скорости на поверхности Земли. Из решения численной задачи получены горизонтальные компоненты тензора напряжений σ_{ij} и поле усредненных скоростей горизонтальных перемещений. Группирование направления скоростей позволило разделить рассматриваемую территорию на 10 зон, границы которых вполне удовлетворительно совпадают с активными разломами. Рассчитаны горизонтальное наибольшее и наименьшее напряжения и их направления. Принимая за третью компоненту напряжение, созданное весом вышележащих толщ, оценивается геодинамическое состояние территории согласно теории разломообразования Андерсона. Полученное геодинамическое состояние сопоставлено с расположением активных разломов. Оказалось, что в зоне динамического влияния Таласо-Ферганского разлома напряже-

ния ориентированы в основном в северо-восточном направлении. Западная часть разлома, ограничивающая Чаткало-Кураминский блок с северо-востока, характеризуется сдвиговыми, а восточная часть, ограничивающая Южно-Тянь-Шаньский блок, – в основном взбросовыми подвижками. Для восточной части южной границы микроплиты (зона динамического влияния Гиссаро-Кокшаальского разлома) напряжения имеют северо-восточные направления, а для западной части – северо-западные. Здесь характерны сдвиговые подвижки и лишь для крайней западной части – взбросы. Во внутренней части микроплиты отмечаются подвижки всех трех типов, связанные с региональными и локальными разломами.

ПЛАВЛЕНИЕ В РАЗЛОМАХ: ПЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА, РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ПСЕВДОТАХИЛИТОВ

А. В. Бабичев, О. П. Полянский, А. Д. Ножкин, Э. В. Сокол

Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН,
Новосибирск, Россия, babichev@igm.nsc.ru

Поведение вещества в разломных зонах несет важную информацию о реологических свойствах вещества коры в условиях высоких напряжений и температур. Мы исследовали породы из зоны Главного Анабарского разлома, претерпевших высокоскоростные тектонические деформации и локальное частичное плавление. В качестве индикаторов деформационных процессов были использованы продукты дислокационного метаморфизма – псевдотахилиты (ПСТ). Возраст деформаций в пределах Главного Анабарского разлома до сих пор оставался неизвестным. Выполненные реконструкции времени формирования деформационных поясов Анабарского щита опирались на возраст синтетектонических мигматитов либо сопутствующих метаморфических, магматических или импактных событий. Они установлены в интервалах 1900–1920 млн лет. Нами впервые определен возраст деформаций в плавленых породах разлома с использованием $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ метода, который составил 1910 ± 24 млн лет [Псевдотахилиты Главного Анабарского ... , 2022].

Установлены параметры хрупко-пластического перехода кварц-полевошпатовых пород и на этой основе предложен новый реологический метод оценки глубины (давления). Для определения глубины

формирования псевдотахилита на момент 1910 млн лет был выполнен расчет палеогеотермы с учетом реальных теплофизических параметров и содержания радиоактивных элементов (U, Th, K) в породах Анабарского щита. Из формы палеогеотермы следует, что фрикционное плавление и связанное с ним образование псевдотахилитов происходило не глубже 18–23 км (4,9–6,2 кбар). С учетом построенной палеогеотермы переход от хрупких деформаций в режим ползучести происходит в диапазоне от ~200 °С (кварц) до ~370 °С (плагноклаз). Температура закрытия K/Ar изотопной системы КПШ составляет 290–370 °С, что попадает в интервал *PT*-условий, при которых кварц переходит в состояние крипа, а плагноклаз еще остается хрупким, как это наблюдается в шлифах ПСТ. Предполагается образование ПСТ путем фрикционного плавления гранулитового протолита в условиях быстротекучего, возможно, сейсмического события. Для оценки скорости выполнено двумерное численное термомеханическое моделирование деформаций в разломе, показавшее, что для условий плавления основного гранулита требовались деформации со скоростями, значительно превышающими тектонические. В процессе коллизии породы с глубины гранулитового метаморфизма 33–41 км (9–11 кбар, [Сапфиринсодержащие гранулиты ... , 2019]) были перемещены на среднекоровый уровень (18–23 км) в результате высокоскоростных (сейсмогенных) деформаций, сопровождавшихся локальным плавлением. Таким образом, псевдотахилиты Главного Анабарского разлома являются индикаторами высокоскоростных деформаций, а сам разлом может рассматриваться в качестве одноранговой коллизионной структуры наряду с основными деформационными зонами Анабара.

Литература

Псевдотахилиты Главного Анабарского разлома (Северная Якутия) – петрологические и хронологические индикаторы плавления при высокоскоростных тектонических деформациях / О. П. Полянский, А. Д. Ножкин, Э. В. Сокол [и др.] // Доклады РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 503, № 1. С. 18–25.

Сапфиринсодержащие гранулиты Анабарского щита / А. Д. Ножкин, И. И. Лиханов, К. А. Савко [и др.] // Геохимия. 2019. Т. 64, № 5. С. 486–502. DOI: 10.1134/S0016702919050070

ОСОБЕННОСТИ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА ОЗЕРА БАЙКАЛ

А. Н. Беседина¹, Ц. А. Тубанов^{2,3}

¹Институт динамики геосфер им. академика М. А. Садовского РАН,
Москва, Россия, besedina.an@idg.ras.ru

²Геологический институт им. Н. Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия

³Бурятский филиал ФИЦ ЕГС РАН, Улан-Удэ, Россия

Еще в середине XX в. стало понятно, что микросейсмы не просто помеха, а эффективный инструмент геофизических исследований. Были получены данные, свидетельствующие о том, что характеристики микросейсмических шумов могут нести информацию об особенностях строения среды, изменениях, которые готовятся или происходят в массиве. В обзоре [Беседина, Тубанов, 2023] показано, что при рассмотрении микросейсмического шума в качестве инструмента геофизических исследований большое значение имеют механизмы генерации и особенности распространения микросейсм, определяющие их пространственно-временные параметры. При применении вероятностного подхода к анализу микросейсмического шума Прибайкалья были обнаружены микросейсмы с характерными частотами около 1 Гц, которые проявляются в период открытой воды оз. Байкал. Для более детального исследования был привлечен поляризационный анализ, который позволил по обратному азимуту идентифицировать микросейсмы как озерные. Для исследования возможных механизмов их генерации выполнялся анализ ветровой нагрузки по данным метеостанций, расположенных вдоль берега оз. Байкал. Показано, что требуется модифицировать модели генерации первичных и вторичных океанических микросейсм для объяснения аналогичных механизмов в закрытом водоеме [Особенности микросейсм ... , 2024]. Понимание этого механизма может позволить использовать микросейсмы, генерируемые озерами, в качестве комплексного инструмента мониторинга эрозийных или перемешивающих процессов в озерах, которые плохо отслеживаются другими средствами. Кроме того, более короткие периоды озерных микросейсм могут оказаться полезными для построения изображений неглубоких структур земной коры в локальных масштабах.

Рассчитанная региональная модель микросейсмического шума была использована для сопоставления с частотными характеристиками амплитуды скорости колебаний в поперечной сейсмической волне от сильных и умеренных землетрясений Байкальской рифтовой зоны [Тубанов, Беседина, Предеин, 2024]. Полученные уровни микросейсмиче-

ского шума и частотно-зависимые оценки уровня амплитуд поперечных волн землетрясений Байкальского рифта могут иметь определяющее значение при обнаружении землетрясений малых магнитуд, необходимых для идентификации активных разломов и параметров источника, при исследованиях сейсмических активизаций и индуцированных землетрясений, а также при разработке региональных уравнений прогнозирования движения грунта.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (темы № 122032900172-5, АААА-А21-121011890033-1, 075-00682-24) и гранта РНФ № 22-27-20066.

Литература

Беседина А. Н., Тубанов Ц. А. Микросейсмы как инструмент геофизических исследований. Состояние вопроса // Вулканология и сейсмология. 2023. № 2. С. 12–32.

Особенности микросейсм озера Байкал по данным сети сейсмических станций / А. Н. Беседина, Ц. А. Тубанов, П. А. Предеин, Д. П.-Д. Санжиева, Г. Н. Иванченко // Физика Земли. 2024. № 3. С. 30–50.

Тубанов Ц. А., Беседина А. Н., Предеин П. А. Спектральные характеристики микросейсмического шума и поперечных волн землетрясений Байкальского рифта // Вопросы инженерной сейсмологии. 2024. Т. 51, № 1. С. 50–65.

ИССЛЕДОВАНИЕ КАРСТОВЫХ ПУСТОТ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ (НА ПРИМЕРЕ ПЕЩЕРЫ ПОДПИХТАРНОЙ, ПРИБАЙКАЛЬЕ)

А. А. Бобров, И. К. Декабрёв

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия,
alexbob@crust.irk.ru

Морфология пещер и закономерности пространственного распределения карстовых форм чаще всего подчинены геометрии разломной сети, тектонической трещиноватости и естественной блочности карстующегося массива [Декабрёв, Черемных, 2023]. Интенсивность карстообразования во многом определяется раскрытостью и глубиной трещин. Таким образом, при развитии карста большую роль играют тектонические трещины и более крупные разрывные нарушения различной кинематики. В работе [Золотарев, Катаев, 2012] отмечается, что поверхностные и подземные карстовые формы имеют сходство в пространственном распределении относительно линейных элементов рельефа (линеаментов). Следовательно, пространственные сети пещер могут служить дополнительной геолого-структурной информацией и

использоваться для реконструкций кинематического типа разрывных нарушений на разных масштабных иерархических уровнях.

Геофизические исследования пещеры Подпихтарной проводились с дневной поверхности. Для регистрации кажущегося удельного электрического сопротивления использовалась многоэлектродная электро-разведочная станция «СКАЛА-48». При проведении электротомографии применялись две косы с шагом между электродами 2,5 м, а последовательность их подключения соответствовала симметричной четырехточечной установке Шлюмберже. Геофизические профили располагались вкрест простирания основной галереи пещеры Подпихтарной. Всего было сделано 10 параллельных профилей электротомографии длиной по 117,5 м каждый. Расстояние между ними составляло 2,5 м. Решение обратной задачи и построение геоэлектрических разрезов производились с применением программного обеспечения Res2DInv. Точность подбора итогового разреза в результате инверсии составила 95,8 % относительно исходных полевых данных.

Удельные электрические сопротивления пород на участке исследования изменяются практически на два порядка: от ~50 до ~8500 Ом·м. Близкое пространственное расположение электроразведочных профилей позволило объединить полученные данные для построения 3D-модели. Выделение границ пустот проводилось по гистограмме распределения удельных электрических сопротивлений. Уверенно выделились как основная галерея пещеры Подпихтарной, так и ее продолжение на юг в виде узкой трещины. Геометрические размеры в построенной 3D-модели отчетливо совпадают с топопланом, за исключением ширины, ввиду поперечного расположения геофизических профилей по отношению к телу пещеры. На участке работ были выявлены две отдельные полости. Первая расположена в 8 м на юг от основной галереи пещеры Подпихтарной, вторая – в 23 м юго-восточнее.

Таким образом, с помощью геофизических исследований имеется возможность получить пространственные данные о геометрии карстовых полостей, которые, в свою очередь, можно использовать как дополнительный геолого-структурный материал для дальнейших тектонических исследований.

Литература

Декабрёв И. К., Черемных А. В. Роль разрывов в формировании пещеры Охотничьей (Центральное Прибайкалье) // Геодинамика и тектонофизика. 2023. Т. 14, № 3. 0704. <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-3-0704>

Золотарев Д. Р., Катаев В. Н. Анализ соотношения структурно-тектонического строения и закарстованности в пределах Полазненской локальной структуры // Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки. 2012. Т. 154, кн. 3. С. 1–9.

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

Л. М. Богомолов, П. А. Каменев, В. А. Дегтярев

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН,
Ожно-Сахалинск, Россия, p.kamenev@imgg.ru

С помощью геоинформационной системы (ГИС) представлены разрывные нарушения о. Сахалин, показанные на государственных геологических картах масштаба 1:1 000 000 и масштаба 1:200 000, а также картах масштаба 1:50 000 [Государственная геологическая карта ... , 2016; 2020]. Были использованы результаты работ других исследователей, представленные в виде публикаций или в виде цифровой информации с открытым доступом. С помощью этих данных о структурно-геологических исследованиях выделены преобладающие кинематические типы основной системы разрывных нарушений о. Сахалин. Сопоставление кинематических характеристик разломов, установленных на основе определений механизмов очагов землетрясений и характеристик, полученных с помощью структурно-геологических методов, показало удовлетворительное соответствие. Для южной и северной частей о. Сахалин преобладающим кинематическим типом разрывных нарушений является взброс/надвиг. Для центральной части характерен смешанный тип кинематики – взброс, реже – сброс, и сдвиг. Выделены две малоинформативные зоны, по которым практически отсутствуют как геолого-структурные данные, так и данные о механизмах очагов землетрясений. На их границах отмечено большее количество механизмов очагов землетрясений со сдвиговой компонентой [Кинематика разрывных нарушений ... , 2024].

Проведенное исследование рассматривается авторами как первичный этап интеграции в ГИС разнородной геолого-геофизической информации. Продолжается развитие новых слоев в формирующейся базе данных, в частности дополнение ее тектонофизическими, геологическими и геофизическими данными.

Литература

Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Третье поколение. Серия Дальневосточная. Лист М-54 (Александровск-Сахалинский): объяснит. зап. / сост.: В. А. Дымович, С. В. Евсеев, В. Ф. Евсеев [и др.]. СПб.: ВСЕГЕИ, 2016. 599 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Изд. 2. Серия Сахалинская. Лист N-54-XXIX (Нефтегорск): объяснит. зап. / Л. М. Чумаков, С. В. Евсеев, О. С. Зуева [и др.]. СПб.: ВСЕГЕИ, 2020. 187 с.

Кинематика разрывных нарушений Сахалина по геологическим и сейсмологическим данным / П. А. Каменев, В. А. Дегтярев, О. А. Жердева, Ю. В. Костров // Геосистемы переходных зон. 2024. Т. 8, № 1. С. 37–46.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ: ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОГРАММЫ CHILD

Л. М. Бызов

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия,
leo@crust.irk.ru

Компьютерная программа комплексного математического моделирования эволюции рельефа CHILD [Tucker, 2011] является одним из наиболее популярных инструментов в своем классе. Она позволяет реконструировать изменения рельефа земной поверхности с учетом разнообразных геодинамических факторов – тектонических, флювиальных, гравитационных и др. В большинстве работ, связанных с использованием CHILD, авторы, в том числе и мы, оперировали временными рамками, характерными для геологических исследований – от первых миллионов [Byzov, Sankov, 2024] до десятков тысяч [Process-based modelling ... , 2003] лет. Реже появлялись публикации, посвященные историческому времени, но и в них рассматривались сроки в несколько тысяч лет [Geoarchaeological simulation ... , 2006]. Однако алгоритмы, прописанные в программе, не вызывают сомнений в возможности ее использования при прогнозировании современных рельефообразующих процессов. В настоящем докладе слушателям предлагается ознакомиться с функционалом CHILD, актуальным для прогнозной реконструкции изменения геоморфологических ландшафтов с периодом до 1000 лет.

В результате серии экспериментов, включающих разработку сценариев, подготовку исходных ЦМР, вычисление и тестирование параметров, были получены абстрактные модели развития дренажной сети, в том числе в условиях различных тектонических преобразований и антропогенного воздействия. Также были построены модели развития склонов с учетом различных параметров склоновой диффузии. В ходе эксперимента был выявлен ряд технических ограничений, связанных прежде всего с балансом между площадью модели и ее пространственным разрешением. Кроме того, вызывают сомнения некоторые опции из тектонического арсенала программы. Однако в целом полученные результаты свидетельствуют о возможности применения CHILD для моделирования современных процессов рельефообразования, в том числе опасных, на конкретных геоморфологических объектах с применением реальных параметров.

Литература

Byzov L., Sankov V. The evolution of continental rifts revealed from the numerical modeling: A case study of the Baikal rift system, Siberia // Journal of Asian Earth Sciences. 2024. Vol. 259.

Geoarchaeological simulation of meandering river deposits and settlement distributions; a three-dimensional approach / Q. Clevis, G. E. Tucker, G. Lock [et al.] // Geoarchaeology. 2006. Vol. 21, N 8. P. 843–874.

Process-based modelling of fluvial system response to rapid climate change—I: model formulation and generic applications / P. W. Bogaart, R. T. van Balen, C. Kasse [et al.] // Quaternary Science reviews. 2003. Vol. 22. P. 2077–2095.

Tucker G. E. CHILD Users' Guide. 2011. Available at: http://csdms.colorado.edu/mediawiki/images/Child_users_guide.pdf

ОБРАБОТКА ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ

А. Ю. Валуйский

Научная станция РАН в Бишкеке,
Бишкек, Кыргызстан, webattack@list.ru

В работе представлена краткая информация о методе электротомографии, содержание обработки данных, полученных с помощью многоэлектродной аппаратуры «СКАЛА-48», в программе для решения прямых и обратных задач Res2DInv. Произведен анализ используемых программ, входящих в стандартный комплект поставки оборудования для обработки полученных данных, а также программ для двумерной инверсии. Приведены результаты двумерного моделирования данных электротомографии на примере профиля «Сан-Таш», который находится в Иссык-Атинском районе Чуйской области.

В настоящее время геофизические методы стремительно развиваются и находят широкое применение в таких областях, как экология, инженерная геология и гидрогеология. Метод электротомографии позволяет эффективно решать широкий круг задач. Однако на Научной станции РАН он применяется не только для детального исследования верхней части геоэлектрического профиля, но и для мониторинга состояния геологической среды. Решение этой задачи зависит от точности полевых наблюдений и создания адекватной геоэлектрической модели для наблюдаемых объектов. В связи с этим важным аспектом является анализ существующих программных продуктов для обработки и инверсии данных наблюдений.

Электротомография представляет комплексный метод, включающий полевые наблюдения с использованием электроразведочных кос,

подсоединенных к прибору «СКАЛА-48», и получение 2D и 3D геоэлектрических разрезов на основе данных, собранных на поверхности Земли. Особенностью электротомографии является многократное использование в качестве питающих и измерительных одни и те же фиксированные на профиле наблюдений положения электродов. Существует множество программ для моделирования и инверсии, однако с началом использования «СКАЛА-48» появилась необходимость применения определенного набора программ для эффективной обработки данных электротомографии.

РАЗЛОМНО-БЛОКОВАЯ СТРУКТУРА ТЕРРИТОРИИ МОНГОЛИИ И СТРУКТУРНЫЙ КОНТРОЛЬ ОРУДЕНЕНИЯ

Ж. Ган-Очир

Ган Скиф Сак ООО, Улан-Батор, Монголия,
j.ganochir26@gmail.com

В работе рассмотрены результаты структурно-металлогенического анализа территории Монголии, проведенного по данным космогеологических, геолого-структурных, структурно-металлогенических и геофизических исследований. Составлены разломно-тектонические и карты плотности разломов, разломно-блоковые карты и кольцевого и кольцево-вихрового строения магматогенных ареалов Монголии в масштабе 1:2 500 000 на 2019–2024 гг. Показано, что разломно-блоковое строение территории определяется ортогональными (меридиональная и широтная) и диагональными (Саянская северо-западная и Байкальская северо-восточная) системами разломов.

Ортогональные системы разломов, выявленные по космическим и геофизическим данным, представляют глубинные (литосферномантийные) структуры. Зона меридиональной системы ВЕБИРС [Верхояно-Бирманская зона ... , 1978] пересекает территорию Монголии на 102–104 долготы и разделяет ее на Западно-Монгольскую зону кайнозойской активности и Восточно-Монгольскую зону мезозойской тектоно-магматической активизации с широким развитием гранитоидов. Широтная и субширотная системы, представленные Гоби-Ононской [Суворов, 1982] и Главной Монгольской тектоническими линиями (линеаментами) [Томуртого, 2012], разделяют территорию Монголии на два суперблока: северный – каледонский и южный – герцинский. Субширотные разломы, разделяющие суперблоки, пересекаются диагональными разломами, образуя торцовое сочленение.

Диагональные системы разломов литосферы выделяются по картам плотности разломов [Ган-Очир, 2019] в сравнении с картой мощности земной коры и литосферы [Зорин, Новоселова, 1982]. Простирающиеся на северо-восток структурно-стратиграфические и тектонические «продольные» структуры пересекаются с северо-западными «поперечными, образуя прямоугольно-блоковые структуры «клиновой» формы с острыми углами, направленными на юг, а иногда и на северо-запад.

Медно-молибденовые, золоторудные и другие месторождения пространственно связаны с узлами пересечения разломов, прямоугольными «клиновыми» и линейно-кольцевыми структурами, что при поиске полезных ископаемых определяет «структурный контроль оруденения» [Ган-Очир, 2019]. Целенаправленные глубинные геолого-структурные исследования разломно-блоковых, кольцево-вихревых структур, таких как «объемное геологическое тело», по представлению С. И. Шермана [Разломообразование в литосфере ... , 1991], позволяют выявить глубокозалегающие (1,5–2,0 км и более) месторождения полезных ископаемых на территории Монголии.

Литература

Верхояно-Бирманская зона сочленения центрально- и восточноазиатских структур (зона ВЕБИРС) / Ю. В. Комаров, В. Г. Беличенко, Л. А. Мишарина, П. А. Петров // Трансазиатская континентальная зона ВЕБИРС (оперативная информация). Иркутск : Вост.-Сиб. филиал СО АН СССР, 1978. С. 5–24.

Ган-Очир Ж. Разломная тектоника и рудоносность (на монголском языке). Улан-Батор, 2019. 141 с.

Зорин Ю. А., Новоселова М. Р. Глубинная структура территории МНР. Новосибирск : Наука, 1982. 94 с.

Разломообразование в литосфере. Зоны сдвига / С. И. Шерман, К. Ж. Семинский, С. А. Борняков [и др.]. Новосибирск : Наука, 1991. 262 с.

Суворов А. И. Структурный план и разломы территории Монголии // Известия АН. Серия геологическая. 1982. № 6 С. 122–135.

Томуртого О. Тектоническое районирование орогенных областей Монголии (на Монголском языке). Улан-Батор, 2012.

СООТНОШЕНИЕ МАГНИТУД ОТ РАЗЛИЧНЫХ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ АГЕНТСТВ И ЗНАЧЕНИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КЛАССА ДЛЯ БАЙКАЛЬСКОГО РЕГИОНА

В. И. Герман^{1,2}, А. А. Добрынина¹, В. В. Чечельницкий^{1,3}

¹Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия, german3v@yandex.ru

²Красноярский научно-исследовательский институт геологии
и минерального сырья, Красноярск, Россия

³Байкальский филиал Единой геофизической службы, Иркутск, Россия

Надежное стандартизованное оценивание силы землетрясений является фундаментальным требованием для получения корректных оценок сейсмической опасности, а также проведения сейсмологических и сейсмотектонических исследований. Как правило, для этих целей используют унифицированные каталоги землетрясений, каждому событию в которых приписано значение магнитуды по поверхностным волнам M_S или значение моментной магнитуды M_w . Для создания таких каталогов требуется решить две существенные проблемы.

Первая проблема заключается в отсутствии определений какой-либо магнитуды для абсолютного большинства слабых и умеренных землетрясений на территории России. Оценка их силы традиционно производится с помощью энергетических классов K . В связи с этим встает задача нахождения корректных зависимостей между магнитудами и энергетическими классами.

Вторая проблема заключается в том, что различные сейсмологические центры часто выдают значимо различающиеся значения магнитуд по одному и тому же набору землетрясений даже в рамках одного типа магнитуды. Это требует нахождения межмагнитудных связей с учетом особенностей обработки данных в этих центрах.

В данной работе для Байкальского региона были построены зависимости между энергетическим классом и магнитудами землетрясений, опубликованными Международным сейсмологическим центром (ISC), от шести агентств: ISC, Единая геофизическая служба РАН (MOS), центр СТВТО (IDC), Геологическая служба США (NEIC), китайский центр (BII), The Global CMT Project (GCMT), Институт земной коры СО РАН (IEC) и Потсдамский центр (GFZ). При этом были рассмотрены четыре основных типа магнитуд: M_S , M_w , по объемным волнам m_b , локальная M_L .

При построении зависимостей магнитуды от K применялся метод обобщенной ортогональной регрессии, учитывающий тот факт, что

магнитуда и K определяются с различными погрешностями (применение метода наименьших квадратов и стандартной ортогональной регрессии в этом случае некорректно). Предварительно также проводилась фильтрация исходных данных, учитывающая их неполноту и наличие аномальных «отскоков», в первую очередь в области минимальных значений магнитуд (в ней они часто непредставительны, определяются по минимальному числу записей, имеющих повышенную зашумленность).

В частности, было установлено, что широко используемая зависимость Т. Г. Раутиан для оценки магнитуды M_S (MOS) по значениям энергетического класса $M = (K - 4,0) / 1,8$ дает завышение значений в среднем на 0,5 при $M_S \approx 6,0$ и на 0,7 при $M_S \approx 4,5$, что способно приводить к завышению сейсмической опасности от 0,7 до 1,0 балла. Предлагается использовать полученное соотношение $M_S(\text{MOS}) = 0,68 K - 4,59$.

Также было показано, что магнитуды M_S от различных сейсмологических центров существенно отличаются: $M_S(\text{MOS}) \approx M_S(\text{ISC}) + 0,1$; $M_S(\text{MOS}) \approx M_S(\text{IDC}) + 0,25$; $M_S(\text{MOS}) \approx M_S(\text{ВЛ}) - 0,55$.

Дополнительно в работе установлено, что значения M_W от агентств GСMT, IEC, NEIC, GFZ и А. А. Добрыниной хорошо аппроксимируются общей зависимостью $M_W = 0,45 K - 1,07$.

ВЛИЯНИЕ ОЛЕДЕНЕНИЙ НА ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ПРИБАЙКАЛЯ

В. А. Голубев

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия
golubev@crust.irk.ru

В прошлом значительная часть Прибайкалья неоднократно покрывалась ледниками, а в наши дни здесь на земную поверхность выносят глубинное тепло десятки гидротермальных источников. В данном сообщении впервые рассмотрены и проанализированы причины совпадения районов/площадей проявления четырех феноменов Прибайкалья: 1) последнего – Сартанского оледенения (24–11 тыс. л. н.); 2) современных естественных (нерукотворных) выходов термальных вод; 3) высоких скоростей подъема северной части горного обрамления Байкала (данные повторного нивелирования); 4) участков дна Байкала с тепловым потоком более 200 мВт/м² (что трехкратно превышает 72±24 мВт/м² – среднее по озеру его значение) [Голубев, 2007]. Из

представленных материалов следует, что это оледенение и три других обсуждаемых фактора наиболее интенсивно проявлены в северной части Прибайкалья. На дне Среднего Байкала и в его обрамлении число гидротермальных источников и сопровождающих их высоких тепловых потоков снижается на порядок по сравнению с их числом севернее. Юго-западнее дельты Селенги выходов термальных вод на берегах Байкала пока не обнаружено. Отсутствуют здесь и отмеченные выше высокие тепловые потоки из дна озера. Во время последнего оледенения верхняя часть горных хребтов Северного Прибайкалья была покрыта ледниками толщиной до 1000 м [Модели эволюции озерных ... , 2015]. Как и в других районах, недавно лишившихся ледниковых покровов, например Фенноскандии и Канадском щите, причиной постгляциального подъема гор Прибайкалья является изостазия и обратимые и необратимые упругие деформации верхнего хрупкого слоя горных пород на глубинах от 0 до 10 и более километров. Обусловленные трещинными деформациями изменения толщины этого слоя коры являются дополнительными к обратимым упругим его изменениям и сравнимы с ними по величине. В Фенноскандии, связанное с ледниками суммарное изменение толщины верхнего слоя земной коры, обусловленное как упругими ее деформациями, так и, сопровождающими их, изменениями объемов трещинных макропорочных пространств, достигает 190 м, что почти в два раза больше изменений толщины этого слоя упругой природы [Богданов, Малова, 2016]. Продолжая эти сравнения, приходим к выводу, что любая вертикаль, проходящая сквозь верхние слои гор Северного Прибайкалья, должна встретить заполненные термальными водами трещинные пустоты коледниковой природы, суммарная мощность которых должна составлять десятки метров и изменяться вслед за изменяющимся весом залегающего над ними тающего/нарастающего ледника. Затухание в южном направлении ближайшего к нам оледенения и привело к отсутствию современных гидротермальных систем на берегах и дне Южного Байкала.

Литература

Богданов В. И., Малова Г. И. Проблемы современной изостазии и масштабные эффекты трещиноватости земной коры континентов и океанов // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2016. Т. 9, № 3. С. 3–17.

Голубев В. А. Кондуктивный и конвективный вынос тепла в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск : ГЕО, 2007. 222 с.

Модели эволюции озерных бассейнов Восточной Сибири в позднем плейстоцене и голоцене / К. Г. Леви, А. И. Мирошниченко, Е. А. Козырева, А. В. Кадетова // *Известия Иркутского государственного университета*. Серия: Геохронология. Этнология. Антропология. 2015. Т. 11. С. 55–85.

ПРИМЕНЕНИЕ БВС В ТЕКТОНОФИЗИКЕ

Н. А. Гордеев

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

Получение точной информации о расположении мелких структурных элементов в естественных образцах является ключевым аспектом современных исследований в области тектонофизики, поскольку качество реконструкций локальных напряженно-деформированных состояний, описывающих прошлые и возможные деформации природных объектов, напрямую зависит от таких данных.

Методология работы: первоочередной задачей является определение масштаба и изгибов объекта интереса. Для начала фото-/видеосъемки выбирается участок на поверхности. Затем проводится съемка по непрерывному маршруту, где каждое изображение перекрывает предыдущее более чем на 20 %. При анализе объекта следует обратить внимание на форму поверхности. Если обнажение имеет сложную геометрию, необходимо выполнить ручную съемку, чтобы избежать появления артефактов в конечной модели из-за упущенных участков. Утраченные при съемке участки объекта восстанавливаются путем интерполяции соседних точек (покрываются единым полигоном), что может привести к потере важной информации. Для съемки изогнутых объектов необходимы тщательное управление оператором и фиксация всех неровностей рельефа. Наличие растительности затрудняет проведение съемки, поэтому для изучения некоторых объектов предпочтительнее выбирать весеннее или осеннее время года.

Начиная с 2019 г. вводятся постепенные ограничения использования МБПЛА. Для обеспечения регулируемой и санкционированной работы нужно соблюдать следующие требования: 1) необходима регистрация МБЛА на портале государственных услуг; 2) каждый полет следует согласовывать с органом администрации территории, где планируется его производить полет; 3) полетное задание нужно зарегистрировать и согласовать на сайте spr1.ivprf.ru.

На заключительном этапе работы с фотограмметрической моделью рекомендуется использовать специализированное программное обеспечение, позволяющее проводить пространственные измерения углов и азимутов падений, примерами которого могут быть Leapfrog Geo и 3D Max.

Полученную посредством фотограмметрии трехмерную модель поверхности можно использовать для определения геометрических

характеристик различных структур (трещин, разломов, складок, жил) и получения данных о их измерениях, ориентации и глубине. Для этого рекомендуется применять программное обеспечение Leapfrog Geo/Viewer (LG). В предлагаемой методике пользователю требуется загрузить в LG привязанную в трехмерном пространстве поверхность и с помощью инструмента «блины» визуализировать видимые поверхности разломов, трещин и жил.

Методический подход был апробирован на нескольких месторождениях Енисейского кряжа, в Горном Алтае и ущельях Киргизского хребта. Дополнительный масштабный уровень исследований структурных элементов земной коры позволяет лучше вникать в тектонику исследуемого региона. С помощью объемных моделей рельефа и ортофотопланов становятся заметны скрытые детали отдельных крупных структурных единиц.

Работа выполнена в рамках финансирования государственного задания ИФЗ РАН.

НОВЕЙШАЯ ТЕКТОНИКА И ГЕОЛОГИЯ ГОРНОГО АЛТАЯ И СОПРЕДЕЛЬНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

**Н. А. Гордеев¹, Л. А. Сим¹, Т. Ю. Тверитинова¹,
Н. А. Сычева¹, О. А. Березин²**

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

²МИГАНК, Москва, Россия

Горный Алтай входит в масштабный Урало-Монгольский пояс и представляет собой сложный горный регион. Здесь происходят частые сейсмические события различной силы, одно из которых уничтожило поселение Бельтир и принесло разрушения в пос. Кош-Агач. Это событие стало поводом для многочисленных исследований геологов и геофизиков.

Авторы данного исследования изучают современную тектонику Горного Алтая, где были получены новые данные о напряженно-деформированном состоянии. Представлены обновленные характеристики перемещений по разломам, локальных стресс-состояний (ЛСС) в зонах влияния этих разломов. Было проведено сопоставление данных о напряженно-деформированном состоянии с сейсмичностью. Было проведено сравнение с современными вертикальными движениями земной коры, полученными с использованием интерферометрии.

Методы и результаты. В работе использованы следующие методы: Структурно-геоморфологический метод Л. А. Сим [Ребецкий, Сим, Маринин, 2017] и его автоматизированная версия SimSGM [Гордеев, Молчанов, 2019; Молчанов, Гордеев, 2021]; метод катакластического анализа (МКА) Ю. Л. Ребецкого [Ребецкий, Сим, Маринин, 2017]; структурно-парагенетический метод дизъюнктивных смещений Л. М. Расцветаева [Ребецкий, Сим, Маринин, 2017]; метод дифференциальной спутниковой радарной интерферометрии, основанной на данных со спутника Sentinel.

Использованы снимки за периоды апрель – май и сентябрь – октябрь.

Главным результатом данного исследования стало наличие согласованности данных о современных вертикальных движениях с выделяемыми тектоническими блоками. Реконструировано общее поле напряжений, охарактеризованное как субмеридиональное сжатие. Анализ реконструкций палеонапряжений показал, что наблюдаемые структуры имеют квазиоднородное распределение напряжений за достаточно длительный промежуток времени, так как в большинстве точек наблюдений имеет место согласованность реконструкций с данными, основанными на результатах СГ-метода, анализа сейсмичности и методами – интерферометрии.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН.

Литература

Гордеев Н. А., Молчанов А. Б. Автоматизация структурно-геоморфологического метода реконструкции сдвиговых тектонических напряжений Л. А. Сим // Геоинформатика. 2019. № 2. С. 25–33.

Молчанов А. Б., Гордеев Н. А. Автоматизация метода реконструкции неотектонических напряжений Л. А. Сим с применением алгоритмов компьютерного зрения // Труды ФНС ГИ КНЦ РАН. Апатиты. 2021. № 18. С. 301–304. DOI: 10.31241/FNS.2021.18.056

Ребецкий Ю. Л., Сим Л. А., Маринин А. В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методики и алгоритмы. М. : ГЕОС, 2017. 234 с.

СВЕРДЛОВСКАЯ РАДИАЛЬНО-КОНЦЕНТРИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА – ЦЕНТР АККУМУЛЯЦИИ УГЛЕВОДОРОДОВ

Е. А. Данилова

Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН,
Екатеринбург, Россия yevgeniya.antoninovna@bk.ru

Геометрия основных тектонических элементов Волго-Уральской нефтегазоносной провинции, а также их расположение и сочетание отображают каркасные элементы юго-западной части очень крупной радиально-концентрической структуры (РКС), выявление и изучение которой стало целью представленной работы.

В процессе исследования было выполнено дешифрирование космического снимка, обобщены и проанализированы геолого-геофизические данные, сведения о тектоническом строении и геоморфологии изучаемой территории.

В результате работ впервые выявлена Свердловская РКС диаметром более 2400 км, включающая восточную часть Русской платформы, складчатый Урал, северную часть Прикаспийской впадины, фрагмент Тургайского прогиба, западную часть Западно-Сибирской плиты, южную часть Печерской синеклизы и Тиманской складчатой области. Она представляет собой сочетание слабовыраженных малоамплитудных кольцевых и радиальных линеаментов. Внутренний кольцевой блок имеет диаметр около 480 км. К его контуру приурочены газогидрогеотермальные явления горы Янгантау и прилегающих к ней территорий Южного Урала, термальные источники Тюменской и Свердловской областей. В центре РКС расположен г. Екатеринбург.

Наличие элементов каркаса Свердловской РКС, выявленных при дешифрировании космического снимка, частично подтверждает интерпретация карт магнитометрических, гравиразведочных, геоморфологических работ и геологических съемок. Эти же методы позволяют выполнить построения более точно и выявить наименее выраженные на космических снимках линеаменты РКС.

Скорее всего, мегаструктура сформировалась во время альпийской фазы складчатости и является центром аккумуляции углеводородов. С ее тектонической активизацией, возможно, связаны месторождения нефти и газа Волго-Уральской, частично Тимано-Печерской и Западно-Сибирской нефтегазоносных провинций. Большая часть залежей углеводородов в пределах мегаструктуры расположена в юго-западном, северо-западном и северо-восточном секториальных ее блоках вдоль радиальных и концентрических разломов.

Свердловская РКС, возможно, является материнской по отношению к выявленным ранее кольцевым структурам восточной части Русской платформы (диаметрами от 250 до 700 км) – Оренбургской, Прикаспийской, Предуральской, Оренбургско-Ромашкинской, Средневожжской, Башкирской, Пермской, Самарской и закартированной настоящими работами в западной части Западно-Сибирской плиты Сургутской (диаметром более 300 км).

Рекомендовано продолжить поисковые работы на нефть и газ в пределах секториальных блоков выявленной Свердловской мегаструктуры.

ВАРИАЦИИ ПОГЛОЩЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН В ОЧАГОВЫХ ОБЛАСТЯХ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

А. А. Добрынина^{1,2,3}, В. А. Саньков¹

¹Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия, dobrynina@crust.rk.ru

²Геологический институт им. Н. Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия

³Институт динамики систем и теории управления
им. В. М. Матросова СО РАН, Иркутск, Россия

В работе представлены результаты исследования поглощения сейсмических волн в очаговых областях сильных землетрясений юга Восточной Сибири на примере Бусингольского (27.12.1991, $M = 6,5$), Южно-Байкальского (25.02.1999, $M = 5,9$), Кичерских (21.03.1999, $M = 6,0$ и $M = 5,9$), Чаруодинских (10.11.2005, $M = 5,8$ и 11.12.2005, $M = 5,6$) и Тувинских землетрясений (27.12.2011, $M = 6,1$ и 26.02.2012, $M = 6,4$). Поперечные волны очень чувствительны к содержанию флюида в среде, поэтому временные вариации отношений скоростей (V_P/V_S) и амплитуд (A_S/A_P) прямых объемных продольных (P) и поперечных (S) волн, зарегистрированных на ближайших к очаговым областям сейсмических станциях (расстояния до 400 км), могут интерпретироваться с точки зрения вариаций содержания флюида в этих объемах коры. Для анализа использовались как землетрясения, входящие в состав афтершоковых последовательностей, так и события, локализованные в прилегающих к ним районах.

Анализ временных вариаций параметров затухания (отношений V_P/V_S и A_S/A_P) показывает их различное поведение для разных афтершоковых последовательностей: наблюдаются две противоположные тенденции в вариациях параметров поглощения сейсмических волн в очаговых областях крупных сейсмических последовательностей. Одна из них выражается в увеличении поглощения (параметр V_P/V_S увеличи-

вается, A_S/A_P уменьшается) со временем и наблюдается для Бусингольских, Чаруодинских и Тувинских землетрясений. Вторая, наоборот, указывает на уменьшение поглощения в ходе сейсмического процесса (отношение V_P/V_S уменьшается, A_S/A_P увеличивается) и отмечается для Южно-Байкальских и Кичерских землетрясений.

Из самых общих соображений о направленности процесса развития хрупких деформаций в очаговых областях сейсмических последовательностей следует вывод об увеличении раздробленности, неоднородности среды в результате реализации таких последовательностей, независимо от геодинамической ситуации. Однако полученные противоположные тенденции изменения параметров поглощения сейсмических волн свидетельствуют о более сложном характере процесса, происходящего в очаговой области, или о влиянии других факторов, обуславливающих изменения поглощения. Эти вариации можно интерпретировать как результат изменения содержания флюидов в очаговой области. Таким образом, уменьшение во времени поглощения связано с вытеснением флюида из области деформаций, и наоборот, повышение поглощения связано с миграцией флюида из окружающего горного массива в очаговую область. Согласно полученным результатам, первая тенденция наблюдается для последовательностей, располагающихся в пределах Байкальской рифтовой системы с преобладающим растяжением земной коры по комплексу геолого-геофизических данных. То есть флюиды концентрируются в области готовящегося очага при растяжении, а затем перераспределяются в более широкой области разрушения. Вторая тенденция отмечена для последовательностей, локализованных в областях с преобладанием условий сдвига и сжатия. Здесь флюид, выдавленный в процессе усиливающегося во времени сжатия перед началом сейсмической активизации, мигрирует в область сформировавшихся хрупких деформаций, существенно изменяя поглощающие свойства массива.

ФЛЮИДОПРОВОДИМОСТЬ ЕСТЕСТВЕННЫХ ТРЕЩИН СДВИГА В ПРИРАЗЛОМНЫХ ЗОНАХ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ И ТЕОРЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Н. В. Дубиня^{1,2}, С. А. Тихоцкий^{1,2}

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия, Dubinya.NV@gmail.com

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

Доклад посвящен использованию концепции критически напряженных трещин для обоснования и прогноза флюидопроводимости естественных трещин сдвига, наблюдающихся в окрестностях крупных разломов. Флюидопроводимость естественных сдвиговых трещин является одним из решающих факторов при планировании разработки месторождений углеводородов в условиях низкой матричной проницаемости пород-коллекторов. Предложен алгоритм прогноза флюидопроводимости таких трещин на основании результатов геомеханического моделирования с использованием специальных аналитических решений, не требующих введения допущений о виде тензора напряжений и в связи с этим применимых для анализа приразломных зон. В работе представлены результаты теоретического анализа интенсивности развития естественной трещиноватости, допустимых пространственных ориентаций сдвиговых трещин, образующихся в окрестностях крупных разломов, а также ограничений на пространственные ориентации сдвиговых трещин, являющихся флюидопроводящими в действующем поле напряжений. Исследована зависимость между параметрами разлома и тенденциями в положениях и пространственных ориентациях флюидопроводящих трещин.

Результаты теоретического анализа подтверждены фактическими данными о флюидопроводимости естественных трещин в окрестностях сейсмически активного разлома в зоне субдукции. В работе использованы данные геофизических исследований скважин, пробуренных в рамках выполнения программы исследовательского бурения океана (IODP). Продемонстрировано, что расширенный комплекс геофизических исследований скважин позволяет определить положения и пространственные ориентации естественных сдвиговых трещин, а также выделить среди них флюидопроводящие. Далее показано, что предложенный алгоритм действительно позволяет делать выводы об особенностях распределений флюидопроводящих сдвиговых трещин на основании геометрии крупных разломов и косвенных индикаторов текущего напряженного состояния.

Рассмотрена возможность решения обратной задачи реконструкции параметров напряженно-деформированного состояния трещиноватой геологической среды на основании анализа флюидопроводимости естественных сдвиговых трещин. На примере скважин исследовательского бурения продемонстрирована возможность реконструкции пространственной изменчивости компонент тензора естественных напряжений геологической среды по мере приближения к крупному разлому, оказывающему существенное влияние на напряженное состояние.

О ПРОЦЕССЕ ПОДГОТОВКИ КУДАРИНСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 09.12.2020, $M_w = 5,5$

П. Г. Дядьков¹, М. П. Козлова¹, Н. А. Гилева²

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
Новосибирск, Россия, dyadkovpg@ipgg.sbras.ru

²Байкальский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН»,
Иркутск, Россия

Анализ сейсмического процесса при подготовке Кударинского землетрясения с учетом разломно-блоковой структуры литосферы и тектономагнитной обстановки в дельте р. Селенги позволил определить некоторые особенности, предшествующие сейсмическому событию 09.12.2020, $M_w = 5,5$.

После землетрясения 13.07.1993, $M_w = 4,9$ в районе Фофановского разлома было зафиксировано снижение выделяемой энергии на 1,5–2 порядка. Это землетрясение имело взбросовый тип подвижки, нетипичный для этой части Байкала. Мы связываем это событие с завершением в Байкальской рифтовой системе «эпизода сжатия», наблюдавшегося в 1992–1993 гг. [Современная динамика ... , 2000].

Следующий этап процесса подготовки Кударинского землетрясения мы связываем с землетрясением 10.10.2001, $M_w = 5$ в районе о. Кокуй и расширением после него области дефицита выделения сейсмической энергии к востоку от будущего эпицентра Кударинского землетрясения.

Наблюдавшаяся стабилизация выделения сейсмической энергии и ее низкий уровень в районе будущего Кударинского землетрясения соответствуют аналогичному явлению, выявленному перед Алтайским (27.09.2003, $M_w = 7,3$) и рядом других землетрясений [Дядьков, Кузнецова, 2008]. Возможность рассмотрения Фофановского разлома как зацепа предлагалась также в докладе [Сейсмичность Центрального Байкала ... , 2023].

Разработанная геомеханическая блочная модель района дельты р. Селенги с учетом таких зацепов на Фофоновском разломе и на западном сегменте Сахалин-Энхалуковского разлома позволила выполнить моделирование изменений напряженного состояния. Моделирование показало, что область экстремумов касательных напряжений после сцеплений соседних блоков по границе указанных разломов перемещается к западной границе залива Провал, вблизи которой произошло Кударинское землетрясение.

Важно отметить, что за месяц до Кударинского землетрясения наблюдалась пауза сейсмического молчания для событий с $M \geq 3$ во всем Байкальском регионе [Дядьков, Козлова, Кулешов, 2023].

Работа выполнена при поддержке проекта FWZZ-2022-0019.

Литература

Дядьков П. Г., Козлова М. П., Кулешов Д. А. Паузы молчания перед Байкальскими землетрясениями // Интерэкспо ГЕО-Сибирь – XIX – СГУТ и Т – Новосибирск. 2023. Т. 2, № 3. С. 129–134.

Дядьков П. Г., Кузнецова Ю. М. Аномалии сейсмического режима перед сильными землетрясениями Алтая // Физическая мезомеханика. 2008. Т. 11, № 1. С. 19–25.

Сейсмичность Центрального Байкала (район дельты Селенги) как отражение разломно-блокового строения земной коры / Н. А. Радзиминович, Ц. А. Тубанов, О. П. Смекалин [и др.] // Солнечно-земные связи и геодинамика Байкало-Монгольского региона : материалы XIV Рос.-монг. междунар. конф., 15–20 сент. 2023 г., г. Иркутск, 2023. С. 584.

Современная динамика Байкальского рифта: эпизод сжатия и последующее растяжение в 1992–1996 гг. / П. Г. Дядьков, В. И. Мельникова, В. А. Саньков [и др.] // Доклады РАН. 2000. Т. 372, № 1. С. 99.

ДЕТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕМНОЙ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧЕСКИ АКТИВИЗИРОВАННЫХ РАЗЛОМОВ ПО АФТЕРШОКОВЫМ ПРОЦЕССАМ КРУПНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И РОЕВЫМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯМ

**А. Ф. Еманов¹, А. А. Еманов^{1,2}, А. В. Фатеев^{1,2},
И. Ф. Ешкунова¹, Е. В. Шевкунова¹**

¹Алтае-Саянский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН»,
Новосибирск, Россия, Referent@gs.sbras.ru

²Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
Новосибирск, Россия

На основе сейсмологических наблюдений в Алтае-Саянской горной области, дополненных временными сетями станций, исследована структура очаговых областей крупных землетрясений и режим развития их сейсмичности во времени [Сейсмологические исследования ... ,

2021]. Общей чертой сейсмичности очаговых областей региона является их длительная активность (десятилетия) с переходом в сейсмическую активизацию очаговой области, запущенную крупным землетрясением. Для Чуйского землетрясения 2003 г. построена объемная структура сейсмически активизированных разломов в очаговой области: выявлено существование элементов с повышенной активностью и слабоактивных участков. Установлены оперения и раздвоения сейсмического процесса по длине магистрального разрыва. Обнаружены горизонтальные сейсмически активизированные слои, примыкающие сбоку к очаговой области [Еманов, Еманов, Фатеев, 2021]. После затишья в сейсмичности региона с задержкой от 6 и более лет пошло развитие сейсмичности в новых очаговых зонах вокруг Чуйского землетрясения, в ближней и дальней зонах. Сформировалась Айгулакская очаговая область, которая в 2019 г. проявила себя как наиболее сейсмичная область Алтая. Развитие сейсмичности протекает в этой области с переходами от хаотичной структуры к организованной в виде элементов активизированных разломов и обратно. Развитие сейсмичности выглядит как серия землетрясений с афтершоками, отсутствием зависимости интенсивности процесса от магнитуды сильнейшего события. В районе стыка Алтае-Саянской горной области с Байкальской рифтовой зоной изучена сейсмичность очаговых областей: Хубсугульских (2014 и 2021 гг.), Бусингольского (1991 г.), Тувинских (2011 и 2012 гг.), Белин-Бий-Хемское землетрясение (2008 г.). Изучена структура сейсмичности Прихубсугулья за 2014–2016 гг. на уровне событий с магнитудами от 1. Показано, что активизированные Хубсугульским землетрясением 2021 г. [Хубсугульское землетрясение ... , 2022] разломы и район возникшего Дархадского роя были асейсмичными. Одновременно с Хубсугульским землетрясением 2021 г. активизировались грани блоковой структуры, в которой усилилась сейсмичность очаговых зон, предшествующих крупным землетрясениям. Установлен иной, чем на Алтае, механизм влияния крупных землетрясений на регион.

Литература

Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В. Сейсмоструктура активизированной объёмной структуры разломов: Результаты исследования верхнекоревой очаговой области Чуйского землетрясения $M_S = 7,3$, произошедшего 27 сентября 2003 г. в Горном Алтае (Россия) // Геотектоника. 2021. № 2. С. 94–104.

Сейсмологические исследования на территории Алтае-Саянской горной области / А. Ф. Еманов, А. А. Еманов, А. В. Фатеев [и др.] // Российский сейсмологический журнал. 2021а. Т. 3, № 2. С. 20–51.

Хубсугульское землетрясение $M_W = 6,7$, $M_L = 6,9$ и афтершоки начального периода / А. Ф. Еманов, А. А. Еманов, В. В. Чечельницкий [и др.] // Физика Земли. 2022. № 1. С. 67–82.

СТРУКТУРНЫЕ ФАКТОРЫ КОНТРОЛЯ ЗОЛОТОГО ОРУДЕНЕНИЯ РУДНОГО ПОЛЯ РАЙГОРОДОК (СЕВЕРНЫЙ КАЗАХСТАН)

**Ю. А. Калинин¹, А. С. Гладков², Е. А. Наумов³,
В. П. Сухоруков¹, Ф. И. Жимулев¹**

¹Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева (ИГМ) СО РАН,
Новосибирск, Россия, kalinin@igm.nsc.ru

²Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

³Центральный геологоразведочный институт, Москва, Россия

Тектоническое строение земной коры играет одну из определяющих ролей в локализации эндогенных месторождений полезных ископаемых, а зоны разломов являются каналами, обеспечивающими продвижение и распределение продуктов магматической деятельности, в том числе гидротермальных растворов. Выделение и характеристика основных деформационных элементов структур рудных полей и месторождений должна являться важной составляющей геологического изучения рудных объектов [Крейтер, 1956]. Объект наших исследований – рудное поле Райгородок в Северном Казахстане – расположен в зоне сочленения Кокшетауского массива (террейна) и Степнякской палеоостроводужной зоны, сложенной ордовикскими вулканогенными и осадочными породами [Штокверковая золотосульфидная ... , 2014]. В его пределах разрабатывается крупное (>100 т Au) [Добывающая ... , 2024] одноименное месторождение штокверкового типа, локализованное в эндо- и экзоконтактах одноименного интрузивного массива степнякского комплекса возрастом 442 млн лет. Месторождение состоит из двух участков: Северного Райгородка и Южного Райгородка. Руды месторождения представлены минерализованными магматическими и скарнированными разнообломочными терригенными породами.

Представления о структурном контроле месторождений рудного поля Райгородок носят самый общий характер. В связи с этим было проведено изучение строения разрывной сети и тектонической трещиноватости в его пределах, а также восстановление полей тектонических напряжений. Полученные результаты позволяют констатировать следующее:

1) рудное поле Райгородок приурочено к узлу пересечения крупных разломных зон северо-восточного (Новоднепровская зона), восток-северо-восточного (Ворошиловская зона) и меридионального (Меридиональная зона) направлений. Указанные зоны характеризуются древним (раннекаледонским) заложением и были неоднократно активизированы на последующих этапах развития;

2) формирование и активизация разрывной сети рудного поля происходили на протяжении как минимум пяти этапов, каждый из которых характеризовался действием определенного поля тектонических напряжений преимущественно сдвигового типа. С двумя из них связано становление рудных тел;

3) созданы и заверены при помощи экспериментальных работ разломно-блоковые модели таких участков, как Северный и Южный Райгородки, которые предлагаются в качестве поисковых структурных признаков.

Литература

- Добывающая промышленность: Центральная Азия. 2024. № 2. С. 40–43.
Крейтер В. М. Структуры рудных полей и месторождений. М. : Гостеолтехиздат. 1956. 272 с.
Штокверковая золотосульфидная минерализация рудного поля Райгородок (Северный Казахстан) / Ю. А. Калинин, К. Р. Ковалев, Е. И. Сухорукова [и др.] // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2014. № 3с, ч. 1. С. 72–75.

О ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ НА О. САХАЛИН

П. А. Каменев

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН,
Южно-Сахалинск, Россия, p.kamenev@imgg.ru

Охарактеризованы неотектоника, новейшие и современные тектонические напряжения о. Сахалин. Для северной части острова (п-в Шмидта) установлены различия геодинамической обстановки между западным и восточным побережьями полуострова. В целом на изученной территории среди типов напряженного состояния преобладают обстановки горизонтального сдвига (сдвиговый тип деформирования).

Зона Центрального Сахалина характеризуется преимущественно субвертикальной ориентацией оси максимального сжатия, а также субгоризонтальной и преимущественно субмеридионально направленной осью минимального сжатия (растяжения). Главной выявленной особенностью Центрального Сахалина является преобладание для всей его территории горизонтального растяжения как типа напряженного состояния [Реконструкция тектонических ... , 2023].

Тектонические напряжения Западно-Сахалинского террейна были реконструированы с использованием различных тектонофизических методов. Представлена реконструкция поля напряжений угольных месторождений Сахалина. Дополнительные полевые тектонофизические

исследования позволили оценить преимущественную ориентацию основных систем зеркал скольжения разной кинематики и на их основе реконструировать параметры локальных стресс-тензоров. По типу напряженного состояния для Западно-Сахалинского террейна наиболее характерным определено горизонтальное растяжение [Каменев, Маринин, 2023].

Неотектонические напряжения, изученные комплексом тектонофизических и структурных методов на Южном Сахалине, показали, что оси максимальных и минимальных сжимающих главных нормальных напряжений регионального уровня ориентированы преимущественно субгоризонтально [Неотектоника и тектонические ... , 2017].

Литература

Каменев П. А., Маринин А. В. Реконструкция палеонапряжений Западного Сахалина по результатам тектонофизических исследований // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2023. № 6. С. 52–65.

Неотектоника и тектонические напряжения острова Сахалин / Л. А. Сим, Л. М. Богомолов, Г. В. Брянцева [и др.] // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8, № 1. С. 181–202.

Реконструкция тектонических напряжений Центрального Сахалина / П. А. Каменев, А. В. Маринин, В. А. Дегтярев [и др.] // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2023. Т. 57, № 1. С. 89–103.

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ТЕКТОНИЧЕСКИЙ БЛОК АЛМАЛЫКА – КАУЛЬДИНСКОЕ РУДНОЕ ПОЛЕ (КУРАМИНСКИЙ ГОРНЫЙ РАЙОН)

Ф. Б. Каримова, Д. И. Джуманиязов

Институт геологии и геофизики им. Х. М. Абдуллаева, Ташкент, Узбекистан,
karimova.ingeo@mail.ru

Геолого-промышленные типы месторождений медных руд Узбекистана включают полиформационные медные, представленные преимущественно крупными месторождениями Алмалыкского горнорудного района, а также медноколчеданные месторождения. Полиформационные месторождения кроме меди содержат молибден, золото, серебро, рений, теллур, селен, висмут, платиноиды и другие элементы. Почти все медные месторождения с большими запасами расположены в Кураминском горном районе, который может быть представлен месторождением Каульды наряду с месторождениями Сары-Чеку, Кальмакыр и Ёшлик [The Mineralogical and Geochemical ... , 2022; Karimova, Jumaniyazov, Tevelev, 2023].

Золотое оруденение Каульдинского рудного поля размещается в пропилизитизированных вулканогенных породах эпидотовой фации, в составе новообразованных минералов которой установлены: эпидот, хлорит, карбонат, альбит, серицит и кварц. Новообразования составляют от 10 до 50 % объема пород и придают им зеленоватый оттенок. В пологой зоне Центрального участка, в скважинных пересечениях, среди гидрослюдисто-серицит-кварцевых метасоматитов были отмечены интервалы пиррофиллит-диаспоровых метасоматитов, которые относятся к фациям вторичных кварцитов и свидетельствуют о дорудном, синвулканическом происхождении пологой рудолокализирующей структуры.

На месторождении Каульды преобладают мелкосреднезернистые и роговиковые структуры руд, а среди текстур – полосчатые и массивные, реже встречаются вкрапленные и прожилково-вкрапленные. Основным полезным компонентом является золото (среднее содержание – 8,12 г/т), попутным – серебро (3 г/т).

Месторождение Каульды по комплексу геологических и минералого-геохимических признаков отнесено к объектам с золото-карбонатно-сульфидно-кварцевым минеральным типом. Геохимический профиль месторождения определяют золото, серебро, мышьяк, сурьма, кадмий, образующие ореолы вдоль рудных тел.

В результате минералогических исследований в изученных образцах участка Садовый месторождения Каульды обнаружены пирит, халькопирит, галенит, сфалерит, касситерит, магнетит, гематит и гидроксидные железорудные минералы. Оказалось, что наиболее распространенным среди них является пирит. Его содержание составляет 98–99 % от общего количества рудных минералов. Минеральный состав всех концентратов практически одинаков. По результатам масс-спектрометрического анализа ISP на 61 элемент установлено, что в несколько раз превышают значения кларка: В, Р, Са, V, Fe, Cu, Co, Zn, As, Se, Mo, Ag, Cd, Sb, Te, Yb, Hf, Ta, W, Re, Au, Pb, Bi и U. Результаты химического анализа минералов, выполненные на электронном микроанализаторе Jeol-8800Rh (Япония), показывают, что встречающиеся пириты в горных породах обогащены Au – 2–3 % и Ag – 0,6–1 %, кроме этого, в пиритах и халькопиритах встречаются платиноиды – 0,2–0,6 %. В метасоматических горных породах содержания РЗЭ достигает до 450 г/т.

Литература

Karimova F. B., Jumaniyazov D. I., Tevelev A. V. Probable Mineralization of Rocks of the Kalmakyr Deposit, Almalyk District, Central Tien-Shan. Moscow University Geology Bulletin. 2023. 78 (3). P. 349–354.

The Mineralogical and Geochemical Features of the Yoshlik Deposit (Almalyk–Angren Mining Region, Uzbekistan) / F. B. Karimova, D. I. Jumaniyazov, S. V. Usmanova [et al.] // Moscow University Geology Bulletin, 2022. Vol. 77, N 6. P. 710–713.

РАЗВИТИЕ ТЕКТОНИКИ, МАГМАТИЗМА И РУДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ В ПРЕДЕЛАХ УДСКО-МУРГАЛЬСКОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО ПОЯСА

М. И. Копылов, А. К. Бронников

Институт тектоники и геофизики им. Ю. А. Косыгина ДВО РАН,
Хабаровск, Россия, Michil.Kopa@mail.ru

Площадь Лоринского рудного узла, расположена в пределах Кони-Пьягинской зоны Удско-Мургальского вулканического пояса. В терминах традиционного тектонического районирования данная территория относится к Западно-Корякской (Кони-Тайгоносской) складчатой системе, занимающей пограничное положение между Верхояно-Чукотской и Корякско-Камчатской областями.

Разрывные нарушения района имеют сложный рисунок в связи с многоплановым ходом тектонических событий [Аноров, 1999]. Через площадь Лоринского рудного узла проходит Среднинская зона глубоких долгоживущих магмоконтролирующих разломов меридионального простирания шириной 12–15 км. Эта тектоническая зона выделяется в основном по геофизическим данным (ΔT , Δg , η_k , ρ_k , U , K , Th) и по результатам дешифрирования радиолокационных и космических снимков. С восточным краем данной зоны совпадает мощная зона градиентов силы тяжести. Более молодыми разломами считаются северо-западные и северо-восточные, заложение которых связывается с развитием Удско-Мургальского и, возможно, Охотско-Чукотского вулканогенных поясов. Разрывные нарушения северо-западной ориентировки широко распространены на всей территории, но большая часть их сконцентрирована в полосе шириной 10–12 км, пересекающей территорию исследований и являющихся частью Бабушкинской зоны разломов.

По морфологии это субвертикальные сбросы, реже сбросо-сдвиги; амплитуда смещения колеблется от нескольких десятков до сотен метров. К ним часто приурочены небольшие интрузии раннемелового, реже позднемелового возраста, субвулканические тела, зоны гидротермально-измененных пород. Северо-западные разломы обычно хорошо дешифрируются на аэрофотоснимках и космоснимках, в аномальном магнитном поле фиксируются зонами градиентов, линейно вытянутыми аномалиями различного знака, с ними совпадает зачастую ориентировка современных водотоков. С Бабушкинской зоной разломов связаны золотые (в том числе и золотороссыпные) и серебряные проявления, на ее пересечении со Среднинской зоной меридиональных разломов расположено молибденово-медное проявление «Лора».

Зоны метасоматически измененных пород и рудные тела располагаются вдоль Главного разлома, смещенного и осложненного разломами северо-восточного простирания. Главная рудная зона расположена в приподнятом блоке, вытянутом вдоль Главного разлома, и имеет форму удлиненной неправильной призмы северо-западной ориентировки. Длина зоны, согласно оценкам, составляет 1000 м, ширина – от 200 до 500 м. Рудная зона представляет зону прожилково-вкрапленной молибден-медной минерализации [Кривцов, 1983] в порфирировых интрузивах (сближенных дайках различного направления), осложненных трубообразными телами брекчий на участках Лора и Прямой. Медно-молибденовая минерализация пространственно связана с телом гранодиорит-порфириров овальной формы, вытянутым в северо-восточном направлении на 2000 м.

Литература

Аноров П. Н. Легенда Магаданской серии Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1: 200 000. Изд. 2-е, Магадан, 1999. 110 с.

Кривцов А. И. Геологические основы прогнозирования и поисков меднопорфирировых месторождений. М.: Недра, 1983. С. 254–258.

ФРАКТАЛЬНАЯ ДИСКРЕТНОСТЬ ЛИТОСФЕРЫ ЮГА ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО РЕГИОНА

М. И. Копылов, А. К. Бронников

Институт тектоники и геофизики им. Ю. А. Косыгина ДВО РАН,
Хабаровск, Россия, Michil.Kopa@mail.ru

Кроме тектонорегистической расслоенности, литосфера юга Дальневосточного региона характеризуется фрактальной дискретностью, проявляющейся в резкой горизонтальной изменчивости физических параметров консолидированной коры и осадочного чехла, приуроченного к межблоковым структурам. Блоковая дискретность строения исследуемого региона была выявлена при анализе ее тектоники по геофизическим (Δg , ΔT , ГСЗ, МТЗ), геологическим и морфометрическим данным, лежащим в средней области спектра 50–100 км. Слоистую модель литосферы предложила И. П. Косминская (1968) на основании дифференцированной слоистости по сейсмическим данным в разных блоках земной коры. Л. И. Брянский наиболее четко сформулировал утверждение «о блоковой природе аномалий силы тяжести» [Брянский, 1995]. В связи с этим профилирующее значение имели данные гравиметрии, вспомогательное – магнитометрии, равномерно

представленные на исследуемой территории в масштабе 1:200 000, что позволяет производить картирование блоковой тектоники под перекрытыми рыхлыми образованиями с использованием данных ГСЗ, МТЗ и МОВЗ по отдельным профилям.

Так, при анализе аэромагнитных карт масштаба 1:200 000 (Северный и Центральный Сихотэ-Алинь, южная часть Охотско-Чукотского пояса), составленных на основе съемок масштабов 1:25 000 и 1:50 000, установлено, что многие особенности аномального магнитного поля не находят объяснения на современных геологических и структурных картах [Абрамов, Абрамова, 1998]. Так, в пределах Охотско-Чукотского и Сихотэ-Алинского (Восточного и Западного) вулканических поясов выделяется серия субмеридианальных и субширотных аномальных зон протяженностью 50–200 км, реже до 300 км. Наиболее интенсивными аномалиями ΔT (до 1000 нТл и более) трассируются субмеридиональные аномальные зоны шириной 10–30 км. Геологическая природа субширотных и субмеридиональных аномальных зон может быть объяснена развитием здесь внутриплитных рифтогенных структур и сопутствующих им трансформных разломов. О возможном развитии рифтогенных структур и поясов на восточной окраине материков указывают ряд исследователей [Абрамов, Абрамова, 1998; Милановский, 2004; и др.].

В отличие от Восточно-Тихоокеанского, Срединно-Атлантического и Индо-Аравийского поясов тектонический процесс, по мнению Е. Е. Милановского [2004], в позднем мелу и кайнозое был наложен на западную часть длительно (с рифея) развивавшегося Циркум-Тихоокеанского подвижного пояса. Это обусловило своеобразие его тектонического положения, структурных форм и их сочетаний, специфику вулканизма, глубинного строения и тектонических процессов. В связи с этим дивергенции литосферных блоков (рифтинг и спрединг) здесь сочетались в пространстве и времени с подчиненными им проявлениями конвергенции. В пределах Сихотэ-Алинской складчатой области заложение палеорифтовых структур, по-видимому, началось в позднем палеозое. Предрифтовое состояние характеризовалось усиливающимся развитием разломов и проявлением вулканогенного магматизма. Отдельные этапы пермского вулканизма отмечены в пределах Ханкайского срединного массива и на территории северо-восточного Китая.

Наиболее активный период рифтогенеза, вероятно, относился к раннему мезозою, где он сопровождался двумя этапами вулканизма: триасово-юрским и позднеюрским. Для триасово-юрского вулканизма характерно широкое развитие толеитовых базальтов однообразного петрографического и химического состава.

Литература

Абрамов В. А., Абрамова В. А. Современная сейсмотектоническая и тектономагматическая активизация Земли // Закономерности строения и эволюции геосфер. Хабаровск, 1998. С. 64–65.

Брянский Л. И. Плотностная структура земной коры и верхней мантии Восточной окраины Азиатского континента. Владивосток : Дальнаука, 1995. С. 92–110.

Милановский Е. Е. Главные типы океанических впадин и особенности их строения и развития // Вестник Московского университета. Серия: Геология. 2004. № 6. С. 3–8.

АНАЛОГОВОЕ ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СДВИГОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА СЕВЕРЕ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ПЛИТЫ

А. Н. Корбутяк, Н. С. Фролова

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Москва, Россия, korbutyakan@mail.ru

В северной части Западно-Сибирской плиты в новейшее время произошла активизация разломов фундамента [Тимурзиев, 2009]. Выделяемые по структурным поверхностям от юры до палеогена эшелонированные разрывы и связанные с ними валообразные поднятия свидетельствуют о наличии обстановки простого сдвига. В данной работе рассматриваются преимущества и недостатки аналогового физического моделирования как инструмента для интерпретации структур осадочного чехла севера Западно-Сибирской плиты.

В качестве эквивалентного материала, имитирующего осадочный чехол, был выбран песок, так как в большинстве случаев природные структурные формы сдвиговых зон больше похожи на модели из песка.

На основе результатов серии экспериментов было доказано, что валообразные поднятия могут образовываться в обстановке простого сдвига без дополнительного сжатия. При этом в моделях валы могут иметь различную морфологию, причем их выраженность в рельефе с глубиной уменьшается. Подобные структурные ситуации имеют место на сейсмических разрывах, пересекающих Еты-Пуровскую систему валов [Тимурзиев, 2009].

Кроме того, была проведена серия экспериментов по воспроизведению смены обстановки растяжения на сдвиговую обстановку. Моделирование показало возможность формирования валообразных поднятий в обстановке сдвига над ранее появившимся рифтом. Природным аналогом подобных структур могут служить крупные эшелонированные валы (например, Варьеганский, Еты-Пуровский). Они сформировались в позднем кайнозое при активизации крупных разломов, входящих в систему Колтогорско-Уренгойского грабен-рифта.

Две проведенных серии экспериментов позволили детально проследить весь процесс и условия образования сдвигового структурного парагенеза, в частности, образования валлообразных поднятий в обстановке простого сдвига. Вместе с тем в некоторых структурных ситуациях имеют место различия в формировании экспериментальных и природных разрывных сетей.

Например, выделяемые в ряде регионов севера Западной Сибири разрывы интерпретируются как сколы Риделя [Тимурзиев, 2009], хотя они располагаются под большим углом к направлению сдвига (до 45–50°). В аналоговых моделях он обычно составляет $\approx 15^\circ$ [Стоянов, 1977]. Это связано с тем, что при физическом моделировании сложно учесть нагрузку осадочного чехла, которая и влияет на величину рассматриваемого угла. Так, результаты математического моделирования сдвиговых зон показали [Бакеев, 2016], что при учете веса осадочного чехла угол между осью зоны и сколами Риделя равен примерно 40–45°.

Полученные результаты имеют практическое значение для повышения достоверности интерпретации сейсморазведочных данных в регионах распространения потенциально нефтегазоносных структур.

Литература

Бакеев Р. А., Стефанов Ю. П. Влияние веса осадочных пород на строение сдвиговых разломных зон // Геодинамика. Геомеханика и геофизика : материалы XVI Всерос. семинара, посвящ. 80-летию со дня рождения акад. С. В. Гольдина. Новосибирск, 2016. С. 26.

Стоянов С. Механизм формирования разрывных зон. М. : Недра, 1977. 144 с.

Тимурзиев А. И. Новейшая сдвиговая тектоника осадочных бассейнов: тектонофизический и флюидодинамический аспекты (в связи с нефтегазоносностью) : дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. М., 2009. 40 с.

ТРЕНИЕ В РАЗЛОМНЫХ ЗОНАХ. ВЛИЯНИЕ НА ЭФФЕКТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ И РАЗЛОМООБРАЗОВАНИЕ

Г. Г. Кочарян

Институт динамики геосфер им. академика М. А. Садовского РАН,
Москва, Россия, gevorgkidg@mail.ru

Результаты исследований последних лет свидетельствуют о том, что на многих участках разломов деформации, накапливаемые в ходе тектонических процессов, могут реализовываться как в виде сейсмогенных динамических подвижек, так и в виде событий медленного скольжения с низкой сейсмической эффективностью. Возможность реализации того или иного режима деформирования разлома определя-

ется соотношением между упругими характеристиками вмещающего массива и фрикционными свойствами зоны скольжения. При этом последние достаточно отчетливо проявляются как явным образом – в структуре ядра разлома, так и косвенно – в очаговых параметрах мелких сейсмических событий.

Имеющиеся данные полевых исследований разломов, в том числе в Байкальской рифтовой зоне, демонстрируют сильную неоднородность строения вдоль простираия. Это определяет существование в одной и той же разломной зоне «сильных» и «слабых» участков, от свойств и взаимного расположения которых и зависит режим скольжения по разлому. Зарождаясь, как правило, на краях «сильных» участков, разрыв способен как разогнаться до скоростей, превышающих разрешенный диапазон для однородной упругой среды, так и распространяться с очень медленной скоростью, характерной для событий медленного скольжения. Изначально эти «сильные» зоны ассоциировались с участками повышенной прочности [Гусев, 1998]. Однако в последние годы обнаруживается все больше свидетельств в пользу того, что «асперити» – это в первую очередь пятна с особыми фрикционными характеристиками, обладающие свойством разупрочнения при скольжении [Трение как фактор ... , 2023]. Тип скольжения разлома эволюционирует от стабильного к динамическому скольжению с увеличением коэффициента трения. Важную роль играют Р-Т-условия и наличие флюида.

Определяемые по результатам инструментальных наблюдений очаговые параметры слабых сейсмических событий могут дать косвенную информацию о материальном составе зоны скольжения и о ее потенциальной сейсмогенности. Представляется важным попытаться использовать эти сведения для оценки и прогноза сейсмической опасности.

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

Литература

Гусев А. А. Модель очага землетрясения со множеством неровностей // Вулканология и сейсмология. 1988. № 1. С. 41–55.

Трение как фактор, определяющий излучательную эффективность подвижек по разломам и возможность их инициирования. Состояние вопроса / Г. Г. Кочарян, А. Н. Беседина, Г. А. Гридин [и др.] // Физика Земли. 2023. № 3. С. 3–32.

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ РАЗЛОМНЫХ ЗОН В НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ РЕГИОНАХ

Д. К. Кузьмин

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия,
dimak1292@mail.ru

Деформационные последствия длительной разработки месторождений углеводородов приводят к обширным оседаниям или поднятиям территории всего месторождения и к локальной деформационной активизации разломных зон [Кузьмин, 2002, 2021]. В свою очередь активизация разломов может привести к опасным последствиям [Анализ результатов деформационных ... , 2019] и поэтому требует более тщательного анализа и более точного маркшейдерско-геодезического мониторинга. Накопленный объем данных многократных геодезических наблюдений, а именно повторных, высокоточных нивелирных наблюдений, показал, что подавляющее большинство аномальных деформаций разломных зон – это локальные «пикообразные» оседания земной поверхности, характерные для кинематики раздвиговых разломов. С подробным иллюстрационным анализом, многочисленными примерами и статистикой можно ознакомиться в работах [Кузьмин, 2022, 2023; Абрамян, Кузьмин, Кузьмин, 2018].

В докладе на базе математического моделирования исследовано напряженно-деформированное состояние разломных зон. Особое внимание уделено параметрической (индуцированной) модели, обобщенной на пороупругую среду, что способствует решению актуальной проблемы по обеспечению безопасности объектов нефтегазового комплекса. Данная модель позволяет рассчитывать распределение горизонтальных, вертикальных и касательных напряжений в окрестности активизированного разлома [Абрамян, Кузьмин, 2019; Kuzmin, Kuzmin, Zhukov, 2022; Жуков, Кузьмин, 2023].

Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН.

Литература

Абрамян Г. О., Кузьмин Д. К., Кузьмин Ю. О. Решение обратных задач современной геодинамики недр на месторождениях углеводородов и подземных хранилищах газа // Маркшейдерский вестник. 2018. № 4. С. 52–61.

Абрамян Г. О., Кузьмин Д. К. Моделирование градиентов смещений земной поверхности на разрабатываемых месторождениях нефти и газа // Маркшейдерский вестник. 2019. № 5. С. 56 – 62.

Анализ результатов деформационных наблюдений системой инклинометров на месторождении им. В. Филановского / Ю. О. Кузьмин, А. В. Дещеревский, Е. А. Фаттахов [и др.] // Геофизические процессы и биосфера. 2019. Т. 18, № 4. С. 86–94.

Жуков В. С., Кузьмин Д. К. Оценка влияния разработки Чаяндинского месторождения на просадки земной поверхности // Геофизические процессы и биосфера. 2023. Т. 22, № 1. С. 73–84.

Кузьмин Ю. О. Деформационные последствия разработки месторождений нефти и газа // Геофизические процессы и биосфера. 2021. Т. 20, № 4. С. 103–121.

Кузьмин Ю. О. Современная аномальная геодинамика недр, индуцированная малыми природно-техногенными воздействиями // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2002. № 9. С. 48–55.

Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика индуцированных разломов // Геофизические процессы и биосфера. 2023. Т. 22, № 3. С. 5–65.

Кузьмин Ю. О. Современные объемные деформации разломных зон // Физика Земли. 2022. № 4. С. 3–18.

Kuzmin D. K., Kuzmin Yu. O., Zhukov V. S. Assessment of ground surface subsidence during Chayanda field development with regard to changes in petrophysical parameters of oil and gas reservoirs // Eurasian Mining. 2022. N 2 (38). P. 11–15.

СОВРЕМЕННАЯ ГЕОДИНАМИКА ИНДУЦИРОВАННЫХ И ОПАСНЫХ РАЗЛОМОВ

Ю. О. Кузьмин

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН,
Москва, Россия, kuzmin@ifz.ru

Разломы являются наиболее распространенным объектом изучения неоднородных геоструктур в науках о Земле. В самом общем смысле разлом – это нарушение, разрыв сплошности среды. Поэтому, когда возникает необходимость описания локальной неоднородности какого-либо поля (напряжений, деформаций, гравитационного, магнитного и т. п.), обращаются к понятию разломной зоны. Разлом – это всегда нелинейное отклонение от упорядоченного течения событий. В широком мировоззренческом смысле разлом – это разрыв шаблона линейного восприятия и описания окружающего мира.

Многочисленные наблюдения показали, что аномальная локальная деформационная активность разломов формируется в обстановке квазистационарных региональных напряжений [Кузьмин, 1989, 2002, 2022] и проявляет ярко выраженный индуцированный характер. Источником индуцирования деформационной активности разломов являются малые эндогенные, экзогенные и техногенные воздействия [Кузьмин, 2019, 2023].

Важным в практическом смысле вопросом является интенсивность (скорость) деформационных процессов в разломной зоне. Если она такова, что за время эксплуатации критически важных объектов деформация становится соизмеримой с пороговой, то такой разлом называется опасным [Кузьмин, 1999, 2004, 2016]. Именно зоны опасных разломов являются областями повышенного промышленного, социально-экономического и экологического рисков для человека и среды его обитания (биосферы).

В докладе подробно рассматриваются проблемы идентификации индуцированных и опасных разломов, описываются механизмы и геомеханические модели их формирования. Приведен анализ большого массива натуральных измерений деформационных процессов для наиболее опасного типа индуцированных разломов – раздвиговых. Исследовано линейное и нелинейное взаимодействие разломов и формирование автоволновых деформационных процессов [Кузьмин, 2020].

Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН.

Литература

- Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика разломных зон осадочных бассейнов и процессы подготовки землетрясений // Прогноз землетрясений. 1989. № 11. С. 52–60.
- Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании. М. : Агентство экон. новостей, 1999. 220 с.
- Кузьмин Ю. О. Современная аномальная геодинамика недр, индуцированная малыми природно-техногенными воздействиями // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2002. № 9. С. 48–55.
- Кузьмин Ю. О. Геодинамический риск объектов нефтегазового комплекса // Российская газовая энциклопедия. М. : Большая рос. энцикл., 2004. С. 121–124.
- Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика опасных разломов // Физика Земли. 2016. № 5. С. 87–101.
- Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика и медленные деформационные волны // Физика Земли. 2020. № 4. С. 172–182.
- Кузьмин Ю. О. Деформационные последствия разработки месторождений нефти и газа // Геофизические процессы и биосфера. 2021. Т. 20, № 4. С. 103–121.
- Кузьмин Ю. О. Современные объемные деформации разломных зон // Физика Земли. 2022. № 4. С. 3–18.
- Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика индуцированных разломов // Геофизические процессы и биосфера. 2023. Т. 22, № 3. С. 5–65.

ДЕГАЗАЦИЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ УЗЛОВ СЕВЕРА РУССКОЙ ПЛИТЫ

Ю. Г. Кутинов, З. Б. Чистова, А. Л. Минеев, Е. В. Полякова

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
им. академика Н. П. Лаверова УрО РАН, Архангельск, Россия,
kutinov@fciarctic.ru

Было проведено исследование на 18 тектонических узлах, выделенных по авторской методике [Кутинов и др., 2022], с использованием цифрового моделирования рельефа и данных дистанционного зондирования Земли на территории Архангельской области. Все изучаемые структуры образованы пересечением рифейских грабенов северо-западного простирания и структурами, слагающими Балтийско-Мезенскую трансблоковую зону, северо-восточного простирания [Кутинов, Беленович, Чистова, 2021]. Наземные мониторинговые исследования проводились на Вельско-Устьянском, Емецком, Холмогорском и Зимнебережном тектонических узлах. В результате зафиксированы [Результаты мониторинговых ... , 2022]: 1) «дефицит» атмосферного давления над периферией тектонических узлов; 2) повышенная плотность облачного покрова на периферии тектонических узлов и почти их полное отсутствие в центре; 3) частота выпадения жидких и твердых осадков выше на периферии, а их количество на 26 % больше; 4) снижение содержания кислорода в приземном слое атмосферы над периферией узлов; 5) изменение электрической проводимости воздуха, выражающееся в ослаблении сигналов сотовой связи, изменении амплитуды и частоты короткопериодных вариаций магнитного поля, искажении (пространственный «отскок») сигналов GPS; 6) кратное увеличение количества гроз и природных лесных пожаров; 7) повышенный подток радона на периферии узлов.

Таким образом, над тектоническими узлами наблюдаются вертикальные каналы эмиссии газов, охватывающие как минимум тропосферу. Причем это явление тесно связано с электромагнитной эмиссией тектонических структур, достигающей ионосферы (слой F_2) и выше. Наблюдаемые процессы характерны и для условно тектонически пассивных территорий древних платформ, к которым относится и исследуемый регион, что позволяет сделать вывод о меняющихся деформационных процессах.

Полученные результаты могут быть корреспондированы и на другие узлы платформенных территорий с учетом их ранга и морфометрических и энергетических характеристик [Кутинов, Беленович, Чистова, 2021].

Исследования проведены в рамках государственного задания № 122011300380-5 Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. Н. П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук.

Литература

Кутинов Ю. Г., Беленович Т. Я., Чистова З. Б. Дискретность земной коры, энергоемкость блоков и сейсмичность Европейского Севера России // Вестник геонаук. 2021. 11(323). С. 16–24. DOI: 10.19110/geov.2021.11.2.

Результаты мониторинговых исследований процессов межгеосферного взаимодействия в тектонических узлах севера Русской плиты / Ю. Г. Кутинов, З. Б. Чистова, А. Л. Минеев [и др.] // Динамические процессы в геосферах. 2022. Т. 14, № 2. С. 10–24. http://doi.org/10.26006/29490995_2022_14_2_10

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ В ОБЛАСТИ КОСЕЙСМИЧЕСКИХ И ПОСТСЕЙСМИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ХУБСУГУЛЬСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ (12.01.2021, $M_w = 6,7$)

М. А. Лебедева, В. А. Саньков

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия,
lebedeva@crust.irk.ru

Эпицентр Хубсугульского землетрясения (12.01.2021, $M_w = 6,8$) приурочен к западному борту Хубсугульской впадины, многочисленные афтершоки локализованы вдоль правостороннего сбросо-сдвига С–СВ простирания, отделяющего блок п-ова Долон-Ула от горного массива. Глубина гипоцентра землетрясения оценена по данным GCMT в 14,3 км, а механизм очага определен как сбросо-сдвиг с осью сжатия, направленной на СВ и осью растяжения, направленной на СЗ.

В исследовании применяется дистанционное зондирование с помощью радара с синтезированной апертурой (SAR), установленного на беспилотных спутниках Sentinel-1B Европейского космического агентства (ESA). Два метода, классической дифференциальной интерферометрии (DInSAR) [Henssen, 2001] и постоянных отражателей (PSInSAR) [Ferretti, Prati, Rocca, 2001], использованы для исследования косейсмических и постсейсмических деформаций. Обработано несколько интерферометрических пар, а также более 30 снимков, снятых после землетрясения.

Смещения земной поверхности, произошедшие во время землетрясения, характеризует интерферометрическая пара снимков, снятая с нисходящего трека с датами съемки 07.01.2021 и 19.01.2021 и обработанная методом DInSAR. Наблюдаемая площадь поверхности, подвергшейся деформации, составляет около 1600 км². Максимальное удаление земной поверхности от спутника вдоль линии визирования (LOS) фиксируется на крыльях разрыва С–СЗ простирания, удаляющихся от спутника по LOS. На восточном крыле разрыва смещение по LOS составляет 19,6 см, на западном 5,6 см. Максимум деформаций располагается на перешейке между п-ом Долон-Ула и западным берегом озера. Кроме того, полосы, наблюдаемые на западном и восточном берегах южнее п-ва Долон-Ула, свидетельствуют о приближении к спутнику по LOS. Максимум этих деформаций располагается в акватории озера. Вышедшие на берег смещения соответствуют приближению к спутнику по LOS на 2,8 см.

Первое применение метода PSInSAR для исследования постсейсмических движений в эпицентральной зоне Хубсугульского землетрясения позволило уловить знакопеременные смещения некоторых отражателей с амплитуды в период до конца октября 2021 г., достигающие 20 мм. Главным образом эти зоны располагаются на западном крыле разлома. На площади, расположенной к востоку от С-СВ разрыва, из-за свойств поверхности практически нет постоянных отражателей из-за растительности и распространения рыхлых отложений. Вследствие этого по данным PSInSAR здесь невозможно зарегистрировать полную картину постсейсмических деформаций.

Литература

Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry // *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*. 2001. Vol. 39, N 1. P. 8–20.

Hanssen R. F. *Radar interferometry. Data interpretation and error analysis*. Delft University of Technology, the Netherlands, 2001. 308 p.

ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ПРОВИНЦИЙ БАССЕЙНОВ И ХРЕБТОВ И РИФТОГЕНЕЗ

М. Г. Леонов

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

Различают линейные рифтогенные системы, приуроченные к магистральным разломам земной коры и ареальные, представленные серией субпараллельных впадин (грабен-синклиналей) и комплементарных им хребтов (горст-антиклиналей), рассредоточенных на значительной площади и не имеющих какого-либо магистрального грабена или разлома. Природа линейных рифтовых систем трактуется как пассивный или активный раскол и раздвижение земной коры и не вызывает значительных разногласий. Расшифровка природы ареальных систем не столь однозначна и требует дополнительного рассмотрения. Проанализированы провинция бассейнов и хребтов (Сев. Америка), Селенгино-Витимская зона (Забайкалье), Зондский шельф Вьетнама, Тянь-Шаньский ороген, рифтовая система Белого моря. Рассмотренный материал позволяет сделать приведенные выводы.

Ареальные рифтовые системы – особый тип коровых ансамблей, для которых, учитывая морфоструктурную специфику и в целях унификации явления, разумно использовать следующие дефиниции: тектоно-динамическую – области рассредоточенного (диффузного) рифтинга (данное определение является общепринятым); морфоструктурную – «провинции бассейнов и хребтов» (название введено для подобного объекта на западе Северо-Американского кратона, оно наиболее полно отражает своеобразие объекта; структурно-генетическую – «области ареально-сдвигового корового коробления» (близкое словосочетание введено Г. Ф. Уфимцевым для Западного Забайкалья).

Формирование таких ансамблей связано не с господством поперечного растяжения или сжатия условного пространства, а с возникновением области объемного сдвигового течения горных масс при регулирующей роли трансенсии и фрактальной организации геологического пространства. Судя по приуроченности некоторых провинций диффузного рифтинга к региональным поднятиям и их дивергентному строению, одним из факторов их возникновения является поперечное гравитационное растекание горных масс в приподнятых и вследствие высокоого стояния динамически неустойчивых объемах коры платформ и орогенов.

Формирование провинций бассейнов и хребтов в удаленных один от другого районах земного шара и в различных геодинамических обстановках хорошо вписывается в представление Ю. Г. Леонова о глобальном проявлении неоген-четвертичного орогенеза, независимого от геологической предыстории того или иного региона. Однако сущность процесса не ясна и может быть сформулирована только в самом общем виде как глобальная активизация земных недр в реидной форме ее проявления.

Тектонические ансамбли типа провинций бассейнов и хребтов не являются аналогами линейных рифтовых систем. Линейные системы – это результат механического раскола континентальной коры (глобальный корово-мантийный тектогенез); ареальные системы – результат 3D реидного течения горных масс (региональный коровый тектогенез), и их не следует отождествлять друг с другом. Кроме того, для провинций бассейнов и хребтов процесс рифтогенеза не является инициальным: структурное оформление грабенов и горстов с разломными ограничениями в большинстве случаев является лишь осложнением изгибной деформации поверхности фундамента. Термин «рифтогенез» (рожденный рифтом) не соответствует явлению ни по сути, ни этимологически.

АКТИВНОЕ РАЗРЫВООБРАЗОВАНИЕ И СОПУТСТВУЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ НА ЗАПАДНОМ ПОБЕРЕЖЬЕ ОЗ. БАЙКАЛ

О. В. Лунина, А. А. Гладков

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия,
lounina@crust.irk.ru

Активные разломы относятся к факторам, которые при прочих равных условиях, способствуют возникновению в их зонах неблагоприятных эндогенных и экзогенных процессов. В их числе поверхностное разрывообразование, разжижение грунтов, просадки и гравитационные явления, которые вносят существенный вклад в формирование окружающей среды и представляют собой опасность для хозяйственной деятельности человека. В связи с этим важно уметь выявлять признаки нестабильного состояния земной поверхности и вести мониторинг ее изменений в случае необходимости. Наши исследования последних лет позволили показать, что это можно делать дистанционно с помощью беспилотной аэрофотосъемки сверхвысокого разрешения.

Западное побережье оз. Байкал ограничивается системой региональных дизъюнктивов, активность которых в позднем кайнозое связана с развитием Байкальского рифта. Объектами наших исследований были конусы выноса, перекрывающие зоны динамического влияния Приморского, Зундукского, Кочериковского и Северобайкальского разломов [Lunina, 2024]. В результате на ортофотопланах и цифровых моделях местности (ЦММ), полученных фотограмметрическим методом, выявлены различные типы разрывных деформаций, которые трудно, а иногда и невозможно обнаружить наземными методами без предварительного обследования с некоторой высоты. Нарушения, имеющие амплитуды смещения до 0,5 м, практически невидимы на доступных космических снимках, поэтому большинство из них, за исключением нескольких, известных ранее на мысе Шартлай, были впервые выявлены на побережьях оз. Байкал. Природа этих разрывов разная, но все они локализируются в зонах динамического влияния разломов. Важно отметить, что современные деформации проявляются избирательно вдоль их протяженности. Наиболее потенциально опасными могут быть участки, расположенные в первых сотнях метров от главного сместителя разлома, узлы их пересечения и периферийные части речных дельт и конусов выноса.

Возможности мониторинга изменений земной поверхности путем вычитания высотных отметок для каждого узла (пикселя) ЦММ апробированы на примере приозерной части дельты р. Риты. Установлено, что ее оседание за 11 месяцев и 19 дней (между 2020 и 2021 гг.) произошло в среднем на 5–10 см. Эти значения ассоциируются с естественным уплотнением осадков. В местах их накопления агрегация произошла на аналогичные величины, уравновесив баланс отложений. В выходах сейсмогравитационных нарушений в отсутствие наносов просадки достигли 33–37 см, что указывает на активные эндогенные и экзогенные процессы в зоне Кочериковского разлома. Подобное сравнение разновременных ЦММ является перспективным и недорогим способом для оценки и прогноза изменений в окружающей среде.

В целом проведенные исследования имеют значение не только для Байкальской природной территории, но и для других регионов мира, где есть необходимость решать проблемы, связанные с устойчивостью геологической среды в местах значительной антропогенной нагрузки.

Литература

Lunina O. V., Gladkov A. A., Bochalgin A. V. Low-amplitude brittle deformations revealed by UAV surveys in alluvial fans along the northwest coast of Lake Baikal: Neotectonic significance and geological hazards // Remote Sensing of Environment. 2024. Vol. 300. 113897.

РАЗЛОМНО-БЛОКОВАЯ СТРУКТУРА ВОСТОЧНОГО КАВКАЗА И СЕЙСМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

Р. А. Магомедов

Институт геологии ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия,
ra-mag@yandex.ru

Анализ разномасштабных геологических, тектонических и структурно-тектонических карт дает представление о широком развитии разноранговых разрывов и разломов практически на любом участке земной поверхности. Тектоническая активизация как геологический процесс существенно влияет на густоту сетки разломов, а сейсмические события, контролируемые разломами, несут самую достоверную информацию об их активизации. В системе разломов действует серия механизмов, создающих сильную неустойчивость. В частности, это и миграция флюидов, циркулирующих в земной коре, способная снизить прочность разлома на порядок. Неустойчивость создают и химическое разупрочнение пород, и фазовые переходы с изменением объема [Черский, Царёв, 1979]. Поведение флюидов в процессе подготовки и реализации сейсмических событий отражает пространственное положение основных сейсмогенерирующих разломов [Вартанян, Куликов, 1982; Магомедов, 2000; и др.]. Дизъюнктивные нарушения также формируют аномальные линейно вытянутые структуры тепловых полей [Суетнов, 1967; и др.].

В каждом регионе обычно устанавливается несколько систем разломов. В Восточно-Кавказском регионе основная сеть ориентирована в субкавказском (продольном) и перпендикулярном к последнему направлениях. Зарегистрирована и диагонально ориентированная к последним сеть разломов, имеющая подчиненное значение [Хаин, 1973; и др.]. Одним из косвенных признаков активности разломов является расположение вдоль них цепочек эпицентров землетрясений. Подавляющее большинство землетрясений в земной коре приурочено к зонам так называемых живых, активных разломов. Хотя очаги современных сильных землетрясений могут располагаться в любой части зоны живого разлома, выявлены места, где они возникают особенно часто. Это пересечения и сочленения разнонаправленных разломов [Магомедов, 2024; и др.].

Для региона северо-восточного сегмента Восточного Кавказа в основном характерна активизация сейсмогенерирующих разломов субкавказской ориентации при режиме деформирования «сжатие», обусловленном встречными движениями двух крупных тектонических

плит – Евроазиатской (Скифской и Туранской) и Аравийской. При этом гипоцентры сильных землетрясений (в том числе исторических) тяготеют к границам сейсмофокальных пластин, уходящим под кавказское складчатое сооружение. Таким образом, с пространственным размещением основных сейсмогенерирующих разломов Восточного Кавказа связаны особенности сейсмичности региона, пространственное положение и миграция очагов сильных землетрясений.

Литература

- Вартанян Г. С., Куликов Г. В. Гидрогеодеформационное поле Земли // Доклады АН СССР. 1982. Т. 262, вып. 2. С. 310–314.
- Магомедов Р. А. Оценка геосейсмической опасности северо-восточного сегмента Восточного Кавказа // Геология и геофизика Юга России. 2024. Т. 14, № 1. С. 49–64.
- Магомедов Р. А. Формирование аномального гидрогеодинамического поля в области Дагестанского клина // Вестник ДНЦ РАН. 2000. Вып. 7. С. 47–49.
- Суетнов В. В. Карта тепловых потоков Дагестана. Махачкала : Дагестан. ФАН СССР. 1967.
- Хаин В. Е. Общая геотектоника. М. : Недра, 1973. 512 с.
- Черский Н. В., Царёв В. П. О новых моделях физико-химических преобразований горных пород в высокоомобильных областях Земли // Доклады АН СССР. 1979. Т. 245, № 5. С. 1200–1203.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК ЗЕМЛИ С ЦЕЛЬЮ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ ПО СЕЙСМОРАЙОНИРОВАНИЮ ТЕРРИТОРИЙ

Т. Е. Малышкин, Н. А. Гордеев

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия,
timurmalyshkin@gmail.com

Выполнение работ по сейсмическому районированию обширных территорий Земли является постоянно актуальной задачей ввиду необходимости учета данного фактора при проектировании, строительстве и эксплуатации зданий и инженерных сооружений. Повышение скорости и точность изыскательных работ по данной тематике – ключевые критерии, учитываемые при разработке новых методов и моделей решения исследуемой задачи.

Данная работа дополняет серию публикаций о разработке метода идентификации разрывных нарушений земной поверхности [Молчанов, Гордеев 2021; Малышкин, Гордеев, 2023, 2024] в контексте приложения метода к структурно-линеamentному анализу для определения потенциальных сейсмоопасных зон. Приводится оценка точности и сопоставление полученных результатов с действующими наборами пространственных данных о сейсморайонировании.

Работа выполнена в рамках государственного задания РАН.

Литература

Малышкин Т. Е., Гордеев Н. А. Критерии обнаружения разрывных нарушений, основанные на данных аэрокосмических съемок Земли // Материалы 62-й Международной научной студенческой конференции. Новосибирск, 2024. С. 15.

Малышкин Т. Е., Гордеев Н. А. Сравнение результатов дешифрирования разрывов по данным мультиспектральной съемки с космических аппаратов «Канопус-в» и «Landsat-8» с аналоговым способом дешифрирования // Динамическая геология – проблемы и достижения : материалы Всерос. науч. конф., посвящ. празднованию 270-летия МГУ им. М. В. Ломоносова и 90-летию со дня рождения Н. В. Короновского, М. А. Гончарова и М. Г. Ломизе. М., 2023. С. 229–2323.

Молчанов А. Б., Гордеев Н. А. Автоматизация метода реконструкции неотектонических напряжений Л. А. Сим с применением алгоритмов компьютерного зрения // Труды ФНС. ГИ КНЦ РАН. Апатиты. 2021. № 18. С. 301–304.

ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ ПОЛЕВЫХ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА СЕВЕРНОМ ТЯНЬ-ШАНЕ И ГОРНОМ АЛТАЕ

А. В. Маринин

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

Полевые тектонофизические работы, проведенные на Северном Тянь-Шане (2009–2018 гг.) и Горном Алтае (2015–2023 гг.), позволили получить представление о кинематике встречаемых на поверхностях разрывных смещений зеркал скольжения, об ориентации отрывно-раздвиговых структур и других малых дизъюнктивных нарушениях. Эти данные использованы для определения тектонических напряжений при помощи структурно-парагенетического метода анализа малых дизъюнктивов Л. М. Расцветаева и метода катакластического анализа разрывных смещений Ю. Л. Ребецкого. Первые подобные реконструкции для Горного Алтая сделаны в работах Д. Дельво с соавторами еще в 90-х гг. прошлого века [Динамика формирования ... , 1995], а для Северного Тянь-Шаня они появились чуть позднее [Basin evolution in ... , 2013; Особенности палео- ... , 2014].

На Северном Тянь-Шане сделано более 4000 измерений, из них со структурно-кинематической информацией – 1837, а по отрывным структурам собрано более 300. Основное количество замеров сделано в палеозойских осадочных и магматических породах. В пределах Кочкорской и Иссык-Кульской впадин много определений получено в кайнозойских отложениях. Суммарно получены основные параметры

139 локальных стресс-тензоров. Преобладает субмеридиональное (СЗ) направление оси максимальных сжимающих напряжений. Хорошо проявлено близкое субгоризонтальное СЗ направление и также много осей максимального сжатия с субвертикальной ориентацией. По данным реконструкции, в регионе доминирует обстановка горизонтального сдвига.

В пределах Горного Алтая сделано 5184 измерений, из них со структурно-кинематической информацией – 2502, а по отрывным структурам собрано 210. Основное количество замеров сделано в палеозойских осадочных и магматических породах. Получены параметры напряженно-деформированного состояния для 202 локальных стресс-тензоров. Повсеместно проявлено меридиональное направление максимального сжатия, кроме того, выявляются СЗ, широтные и СВ ориентировки. Ось промежуточных напряжений в основном ориентирована субвертикально. На Горном Алтае преобладают обстановки горизонтального сдвига и сжатия. При полученном сходстве ориентировок для соседних районов, просматриваются и различия в направлениях горизонтального стресса в целом по региону, что свидетельствует о значительной латеральной неоднородности и блоковом строении земной коры.

Разнообразные структурные рисунки и параметры напряженно-деформированного состояния, выявленные структурно-парагенетическим и катакластическим методами анализа дизъюнктивных нарушений в структурах Северного Тянь-Шаня и Горного Алтая, обусловлены сложной структурной организацией Центрально-Азиатского складчатого пояса с разноплановыми субдукционно-коллизийными и пост-коллизийными деформациями.

Исследования проведены при финансовой поддержке Госзадания ИФЗ РАН.

Литература

Динамика формирования и палеостресс при образовании Чуйско-Курайской депрессии Горного Алтая: тектонический и климатический контроль / Д. Дельво, К. Тениссен, Р. Ван-дер-Мейер [и др.] // Геология и геофизика. 1995. Т. 36, № 10. С. 31–51.

Особенности палео- и современных напряжений Северного Тянь-Шаня / Л. А. Сим, Н. А. Сычева, В. Н. Сычев [и др.] // Физика Земли. 2014. № 3. С. 127–141.

Basin evolution in a folding lithosphere: Altai–Sayan and Tien Shan belts in Central Asia / D. Delvaux, S. Cloetingh, F. Beekman [et al.] // Tectonophysics. 2013. Vol. 602. P. 194–222.

ОСОБЕННОСТИ РАЗЛОМНОЙ ТЕКТОНИКИ И СЕЙСМИЧНОСТИ БУРЕЙНСКОГО ОРОГЕНА

Т. В. Меркулова, Г. З. Гильманова

Институт тектоники и геофизики им. Ю. А. Косыгина ДВО РАН,
Хабаровск, Россия, merkulova@itig.as.khb.ru

По геологическим данным, в пределах Буреинского орогена проявлены крупные региональные разломы только северо-восточной и субширотных ориентировок [Забродин, Рыбас, Гильманова ... , 2015]. Однако субмеридиональная ориентировка региональной аномалии отрицательного знака гравитационного поля, контролирующей ороген, позволяет предполагать наличие скрытых разрывов этого направления. Анализ роз-диаграмм линий преобладающей вытянутости мелких линейных элементов рельефа так же демонстрирует доминирование элементов рельефа субмеридиональной ориентировки. Для обнаружения разломов скрытого типа как субмеридионального, так и северо-западного направления использован комплекс признаков тектонической нарушенности: анализ рельефа дневной поверхности (линеаменты, сгущения линий вытянутости элементов рельефа, аномалии плотности линеаментов), линейные аномалии гравитационного и магнитного полей, аномальные величины V_s/V_p . На основе комплексного анализа выявлены крупные зоны разрывов субмеридионального и северо-западного направлений и изучена их сейсмическая активность. Пространственное распределение сильных и скоплений слабых сейсмических событий в пределах орогена не всегда совпадает. Выполнены расчеты сейсмической энергии для относительно сильных землетрясений с $M \geq 3$ и слабых сейсмических событий с $M < 3$. Изучена связь аномалий сейсмической энергии с разломами, в том числе скрытыми, и их пересечениями. Исследован контроль сильных землетрясений $M \geq 5$ и скоплений слабых землетрясений аномалиями гравитационного, магнитных полей, линеаментами рельефа дневной поверхности разной ориентировки и их суммарной плотностью. Выявлены различия в контроле сильных землетрясений в северной части орогена, где, по данным повторного нивелирования, отмечается поднятие со скоростью 5,2 мм/год, в то время как южная часть испытывает опускание [Карта современных..., 1989]. В первом случае сильные землетрясения контролируются локальными аномалиями гравитационного поля пониженной интенсивности, во втором случае – аномалиями повышенной интенсивности северо-восточной ориентировки.

Литература

Забродин В. Ю., Рыбас О. В., Гильманова Г. З. Разломная тектоника материковой части Дальнего Востока. Владивосток : Дальнаука, 2015. 129 с.

Карта современных вертикальных движений по геодезическим данным на территорию СССР (СВДЗК) / под ред. Кашина Л. А. М. : ГУГК, 1989. 4 л.

ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИЯ В КОМСОМОЛЬСКОМ РУДНОМ РАЙОНЕ (НА УРОВНЕ КЛАРКОВЫХ СОДЕРЖАНИЙ): ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНО-ДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

А. Н. Митрохин, В. П. Уткин, П. Л. Неволин

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН,
Владивосток, Россия, stakhor@yandex.ru

Полученные нами данные [Митрохин, Уткин, Неволин, 2024] показывают, что источниками поступления регионального магния (MgO) были явно корово-мантийного и мантийно-корового генезиса K_1al-K_2km изверженные породы пурильского и силинского комплексов мяочанской серии, что не противоречит существующим представлениям о магматизме Комсомольского района (КР). И обогащенные магнием ареалы, и продукты названных комплексов приурочены главным образом к замкам и крыльям K_1al-K_2km синсдвиговых СВ–ВСВ выступов и прогибов терригенного T_3-K_1v основания в парагенезе с соскладчатými и сосдвиговыми разрывами синсдвигового структурного ансамбля в пределах собственно рудоносной части КР (между ССВ Мяочанским и Холдаминским материнскими левыми сдвигами Комсомольской сдвиговой зоны – КСЗ).

Так, наибольшие ареалы плюсового магния тяготеют к полосе развития основных разностей силилинских монцонитоидов и их эффузивных аналогов амутской свиты: на крыльях и в ядрах/замках СВ Центрального антиклинального выступа (1-го порядка) и смежных с ним Западного и Восточного синклинальных прогибов. При этом если к ядру первого приурочен лакколитоподобный Силинский монцонитоидный батолит (наряду с Чалбинским – крупнейший в КР) с краевыми фациями кварцевых габбро и габбро-диоритов в его эндоконтакте, то верха второго компенсированы пологими толщами лав базальтов и андезибазальтов и их дериватов амутской свиты.

Свою зримую лепту в приток магния внесла и наиболее основная часть пурильских гранодиоритов, которые, локализуясь в целом в виде малых (штоковых, дайковых) форм, ассоциируют с плюсовыми аномалиями MgO в узлах сочленения соскладчатых и сосдвиговых структур по типу сжатия (транспрессии). Наиболее полно этот парагенезис представлен в зоне сопряжения крыльев и замка Восточного прогиба (с его СВ взбросами по типу прямого веерного кливажа и субпослойными надвигами в вулканитах и их основании) с транспрессионным сочленением СЗ Секташского правого сдвига через субширотные (типа Курмиджинского разлома), СВ–ВСВ взбросы и СЗ правые сдвиги с ССВ левыми сдвигами КСЗ (прежде всего Перевальненским и звеньями Холдаминского материнского разлома). В схожих, но локальных сочетаниях своих элементов этот парагенезис с плюсовыми аномалиями MgO фиксируется на СВ выступах и в прогибах 1-го порядка как вблизи отдельных мелких пурильских и силинских интрузий, так и просто в зонах сочленения разрывов указанных направлений.

Один из главных факторов формирования ареалов минусового MgO – резкая активизация всей системы будущих рудоносных ССВ левых сдвигов КСЗ под действием ССЗ сжатия. Активизация привела к избирательному оттоку магния из С–СЗ зон сосдвигового растяжения (транстенсии), его ремобилизации и перераспределению вдоль сдвигов и их сближенных серий (локальные минусовые и плюсовые аномалии MgO).

Литература

Митрохин А. Н., Уткин В. П., Неволин П. Л. Структурно-динамические и геохимические аспекты пространственного распределения магния на предрудном этапе формирования Комсомольского рудного района // Естественные и технические науки. 2024. № 5 (192). С. 162–165. DOI: 10.25633/ETN.2024.05.13

ПРЕДСКАЗАНИЕ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ НА GPU ПО КОСМОСНИМКАМ

А. Б. Молчанов, Н. А. Гордеев

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия,
alexeybm2009@gmail.com

Авторы долгое время работают над расширением сферы применения структурно-геоморфологического метода Л. А. Сим [1991]. Ими была разработана программа SimSGM [Гордеев, Молчанов, 2019] для автоматизации этого метода, позволившая массово применять его на большом числе регионов. Прямая задача метода – определение ориентаций осей неотектонических напряжений в системе сопряженных трещин. Для идентификации таких систем используются геологические данные, цифровые модели рельефа и/или космические снимки в областях влияния разломных структур. В настоящее время фокус исследований сместился в сторону решения обратной задачи – разработки автоматических алгоритмов для поиска самих разрывов по результатам анализа линейных элементов рельефа (линеаментов) и областей с постоянным полем напряжений [Молчанов, Гордеев, 2022].

Решение прямой задачи осуществляется в три этапа: 1) предварительная обработка изображения; 2) дешифрирование линеаментов; 3) классификация геодинамического типа по М. В. Гзовскому. Поскольку положение разрыва и область его динамического влияния известны заранее, на втором и третьем этапах работа ведется со сравнительно небольшим количеством данных: линеаменты дешифрируются в заданной области, а окна анализа располагаются вдоль линии разрыва. При решении обратной задачи второй этап необходимо проводить в каждой точке всей исследуемой площади, третий – для всех возможных направлений искомого разрыва. Такой анализ может проводиться независимо, что благоприятствует применению параллельных вычислительных алгоритмов, выполняемых на графическом ускорителе (GPU), способных значительно ускорить весь процесс.

Предлагается два параллельных алгоритма: для дешифрирования линеаментов и предсказания разрыва. При дешифрировании происходит поиск незамкнутых контуров по преобработанной ЦМР (или спутниковому снимку), содержащей линии толщиной в один пиксель. Каждое ядро GPU обрабатывает один пиксель изображения вместе с восемью ближайшими соседями. Сначала в несколько итераций удаляются пересечения линий, затем маркируются их концы и промежуточные точки. По полученной маркировке составляется связный спи-

сок координат каждого линеамента. Такой подход позволяет сразу же отбросить скрученные или замкнутые линии, а также провести классификацию на сколы или отрывы. Этот алгоритм оказался в 50 раз быстрее традиционного алгоритма Suzuki [Suzuki, Abe, 1985], широко используемого в современных библиотеках компьютерного зрения. Предсказание разрыва в точке основано на последовательном расчете коэффициентов принадлежности к тому или иному геодинамическому типу в процессе смещения окна анализа вдоль рассматриваемого направления. Если тип меняется слишком сильно (например, с правого на левый или через один по классификации), коэффициент обнуляется. После всех расчетов выбираются направления с максимальным коэффициентом.

Литература

Гордеев Н. А., Молчанов А. Б. Автоматизация структурно-геоморфологического метода реконструкции сдвиговых тектонических напряжений Л. А. Сим // Геоинформатика. 2019. № 2. С. 25–33.

Молчанов А. Б., Гордеев Н. А. Автоматическое определение типов и трендов трещиноватости в зоне новейших разрывов в программе SimSGM // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2022. Т. 19. С. 244–247. doi.org/10.31241/FNS.2022.19.044

Сим Л. А. Изучение тектонических напряжений по геологическим индикаторам (методы, результаты, рекомендации) // Известия вузов. Геология и разведка. 1991. № 10. С. 3–22.

Suzuki S., Abe K. Topological Structural Analysis of Digitized Binary Images by Border Following // CVGIP. 1985. Vol. 30, N 1. P. 32–46.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЖЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА НАД АКТИВНЫМИ РАЗЛОМАМИ ФУНДАМЕНТА В ПРИЛОЖЕНИИ К ЗАДАЧАМ ТЕКТОНОФИЗИКИ

Д. С. Мягков

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

В данной работе рассматриваются математические модели формирования напряженно-деформированного состояния осадочного чехла над разломами фундамента разных типов (взбросы, сбросы, взрезы), а также над активными блоками фундамента. Моделирование проводится с целью изучить структуру распределения деформаций над разломами и сравнить полученные результаты с данными физического моделирования. Основное внимание уделяется особенностям напряженного состояния над разломами в зависимости от их типов, взаимно-

го расположения и величины смещения по ним. Показан результат суперпозиции аномалий напряжений от системы разломов. Отдельно исследуется вопрос о формировании рельефа на поверхности модели (осадочного чехла) в зависимости от геометрии разломов фундамента.

Результаты моделирования сравниваются с аналогичными физическими [Ребецкий, 2011] и аналитическими моделями. Для расчета применялась явная конечно-разностная схема, разработанная Л. М. Уилкинсом для исследования упруго-пластических тел и усовершенствованная Ю. П. Стефановым [2005] для применения в геомеханике. Моделирование проводилось в двумерной постановке. Тела модели рассматриваются как упругопластические. Построенные серии моделей напряженно-деформированного состояния осадочного чехла над разломами фундамента позволили уточнить геометрию зон максимального уровня деформаций и напряжений разных типов (касательных, нормальных, среднего) при использовании упруго-пластических моделей, соответствующих современным понятиям геомеханики горных пород осадочных бассейнов. Результаты моделирования показали, что физические и аналитические модели не полностью корректно отображают деформированное состояние пород над активным разломом, и позволили более детально сопоставить геометрию как внутрикорового напряженно-деформированного состояния, так и распределение приповерхностных деформаций и форм рельефа разлому конкретного типа. Полученные решения могут быть использованы при тектонофизическом анализе и решении обратных задач геодинамики.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФЗ РАН.

Литература

Ребецкий Ю. Л., Михайлова А. В. Роль сил гравитации в формировании глубинной структуры сдвиговых зон // Геодинамика и тектонофизика. 2011. Т. 2, № 1. С. 45–67. <https://doi.org/10.5800/GT-2011-2-1-0033>

Стефанов Ю. П. Некоторые особенности численного моделирования поведения упруго-хрупкопластичных материалов // Физическая мезомеханика. 2005. Т. 8, № 3. С. 129–142.

МАГМАТИЗМ КАК КЛЮЧЕВОЙ ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ НАДЛИТОСТАТИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ СИБИРСКОГО КРАТОНА И ЦЕНТРАЛЬНО-АЗИАТСКОГО СКЛАДЧАТОГО ПОЯСА

Д. С. Мягков, Ю. Л. Ребецкий

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

В работе исследуется механизм генерации надлитостатических коровых напряжений при формировании магматических поясов. Нагружение среды происходит за счет давления магматического расплава в процессе его продвижения при формировании интрузий и до его застывания. Давление расплава при этом контролируется давлением в очаге и может существенно превышать величину нормальных напряжений в среде, что приводит к существенной перестройке напряженно-деформированного состояния коры при образовании крупнейших, в первую очередь транскоровых систем интрузий. Степень нагружения контролируется также плотностью магмы, подробно тектонофизический анализ генерации рассматриваемых аномальных напряжений представлен в [Ребецкий, Стефанов, 2022].

В данной работе представлены численные модели нагружения среды под влиянием единичных интрузий а также модель генерации напряжений юго-западной части Сибирского кратона и обрамляющих его структур (Алтае-Саяны, впадины западной Монголии). Методика моделирования разработана Уилкинсом для исследования упруго-пластических тел и усовершенствована Ю. П. Стефановым [2005] для применения в геомеханике. В ее рамках среда рассматривается как упрочняющееся упругопластическое тело, используется неассоциированный закон пластического течения, подробное описание представлено в работе [О генезисе напряжений ... , 2018]. В численной модели представлены магматические пояса девон-юрского возраста, формирование которых связано с действием Алтайской, Селенгинской и Южно-Монгольской вулканических дуг. В модели магматические пояса аппроксимируются едиными транскоровыми интрузиями, последовательная активация которых приводит к формированию аномальных напряжений, уровень которых (первые десятые Кбар) сопоставим с общим уровнем напряжений коры внутриконтинентальных орогенов, а это означает, что формирование транскоровых интрузий может являться основным механизмом генерации тектонических напряжений Центрально-Азиатского складчатого пояса и южной части Сибирского кратона.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФЗ РАН.

Литература

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

Ребецкий Ю. Л., Стефанов Ю. П. О механизме взаимодействия сильных землетрясений и вулканизма в зонах субдукции // Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр». Серия: Науки о Земле. 2022. Т. 4, № 56. С. 41–58.

Стефанов Ю. П. Некоторые особенности численного моделирования поведения упруго-хрупкопластичных материалов // Физика мезомеханики. 2005. Т. 8, № 3. С. 129–142.

РАЗЛОМНЫЕ СТРУКТУРЫ И МОНИТОРИНГ ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ В ЗОНЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВИЗАЦИИ ГОРЛОВСКОЙ ВПАДИНЫ

**Н. Н. Неведрова¹, А. М. Шалагинов¹, А. М. Санчаа¹,
И. О. Шапаренко¹, С. М. Бабушкин²**

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики (ИНГГ) СО РАН,
Новосибирск, Россия, NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

²Сейсмологический филиал Единой геофизической службы РАН,
Новосибирск, Россия

На территории России имеются регионы, в которых развивается сейсмичность, связанная с техногенными воздействиями на геологический массив. Примером является Бачатское землетрясение (2013 г., $M_L = 6,1$), произошедшее в районе интенсивно разрабатываемых угольных месторождений Кузбасса и вызвавшее масштабные разрушения жилой инфраструктуры. В Горловском угольном бассейне Новосибирской области в 2019 г. произошло Колыванское землетрясение с магнитудой $M_L = 4,3$, и далее сейсмичность только усиливается в области крупных добывающих карьеров [Техногенная сейсмическая ... , 2021].

Начиная с 2020 г. комплексом методов наземной электроразведки выполняются измерения, направленные на уточнение строения Горловской впадины с целью получения геоэлектрических характеристик горных пород и выявления разломных структур. Разрез по данным ЗСБ и ВЭЗ по профилю, пересекающему Чемской и второстепенный разломы, ограничивающие впадину на востоке со стороны Салаирского кряжа, отражает глубинное строение отложений впадины и разломных структур. Оба разлома на разрезе выделяются общей зоной пониженных значений удельного электрического сопротивления (УЭС) относительно вмещающих пород, ширина которой на глубине 200 м составляет ~250 м. Структурные особенности этой зоны: почти вертикальная западная граница и наклонная восточная. Метод электротомографии

(ЭТ) используется для структурных и регулярных наблюдений. Изменения ЭТ были выполнены по профилям на локальных участках в области перехода от отложений Горловской впадины к Салаирскому кряжу для построения геоэлектрических моделей верхней части разреза. В результате совместного анализа полученных геоэлектрических разрезов, геологических и сейсмологических данных было выяснено, что Чемской разлом отражается понижением УЭС не на всех разрезах ЭТ, что может быть связано с повышенной активностью только его отдельных фрагментов.

Регулярные наблюдения методом электротомографии, начатые в 2023 г. в зоне сейсмической активизации Горловской впадины, дают возможность проследить влияние происходящих землетрясений и взрывов в карьерах на геоэлектрические параметры. По результатам мониторинга методом ЭТ вариации УЭС отражают реакцию геологической среды на природно-техногенные землетрясения, их величина достигает 50 %. Величина вариаций на взрывы существенно меньше и составляет 2–5 %, что позволяет отличать их от землетрясений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Программы фундаментальных научных исследований № FWZZ-2022-0025.

Литература

Техногенная сейсмическая активизация в районе Горловского угольного бассейна / А. Ф. Еманов, А. А. Еманов, А. В. Фатеев [и др.] // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2021. Т. 8, № 1. С. 207–210.

ДИНАМИКА МЕЖБЛОКОВЫХ ЗОН И СКЛАДЧАТОСТИ В ПРИМОРЬЕ

П. Л. Неволин, А. Н. Митрохин, В. П. Уткин

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН,
Владивосток, Россия, nevpeter@yandex.ru

Мезо-кайнозойские межблоковые сдвиговые зоны (МБЗ) вследствие ротации Земли → смещения Евразии → ССЗ сжатия [Уткин, 2016] с шагом ~50 км разделяют PR фундамент и PZ-MZ чехол Приморья на продольные блоки (ПБ) (~550×150 км), омолаживающиеся на восток. Область динамического влияния [Шерман, Борняков, Буддо, 1983] МБЗ включает: сдвиги, учащающиеся к оси зоны, раздвиги, сбросы, аксоноклинали, а также нормальные к сжатию «надразломные» СВ–ВСВ складки. В МБЗ они инфраструктурные, в ПБ – региональные (РС), рассеченные сдвигами 2–4 рангов. Динамика пологих

складок представляет череду импульсов сколово-складчатого коробления – пульсирующего смятия. Структурирующий импульс сжатия при этом проявился резкой активизацией сопряженных сколов (взбросов-надвигов), формирующих скелет будущих складок. Сами складки – эффект ползучести [Шерман, Борняков, Буддо, 1983] на фоне уменьшения сжатия. В сложную складчатую МЗ конструкцию вплетены «линзо-блоки» PR и PZ структур, которые в МБЗ развернуты влево. Общность динамики МБЗ и ПБ определяется их формированием под действием главного ССЗ сжатия (σ_1), а отличие состоит в том, что средняя ось деформации σ_2 в ПБ ~ пологая, а в МБЗ σ_2 ~ крутая. Это динамическое отличие определило для МБЗ и ПБ металлогеническую значимость. Разуплотненные антиформы-своды региональной складчатости, согласные с пологой средней осью деформации, стали благоприятным пространством для гранитизации и оруденения. Это подтверждает анализ складчатости, распределения интрузивов, Au, W, Pb, Zn и др. месторождений, а также региональных геофизических и геохимических карт. Например, Лермонтовский свод, Колумбинский свод и Благодатненский ареал [Неволин, Митрохин, Уткин, 2018] играют концентрирующую роль благодаря экранирующей надвиго-взбросо-складчатой системе. Они визуализируют пологие ВСВ «тоннели разуплотнения». Сосдвиговые раздвиги в МБЗ также являются важнейшей магмо-рудоконтролирующей системой разуплотнения, но с субвертикальной осью σ_2 . Вместе с тем, вероятно, наиболее важным является то, что сами МБЗ выступают как структуры, подводящие эндогенную энергию и вещество из глубоких уровней коры.

Структурирование среды стоит рассматривать как приоритетный динамо-тектонический алгоритм генерации, мобилизации и стабилизации эндогенного вещества.

Литература

Неволин П. Л., Митрохин А. Н., Уткин В. П. Сихотэ-Алинская складчатая система: общие особенности строения и некоторые аспекты контроля золотого оруденения (на примере Центрального Сихотэ-Алия) (часть первая) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2018. № 2 (вып. 38). С. 84–100.

Уткин В. П. Что определяет развитие Азиатско-Тихоокеанской зоны перехода: геодинамика движений океанических плит или Азиатского континента? // Доклады Академии наук. 2016. Т. 467, № 3. С. 314–319.

Шерман С. И., Борняков С. А., Буддо В. Ф. Области динамического влияния разломов (в результате моделирования). Новосибирск : Наука, 1983. 112 с.

НОВЫЕ ДАННЫЕ О СТРОЕНИИ ЗОНЫ СОЧЛЕНЕНИЯ БАЙКИТСКОЙ АНТЕКЛИЗЫ И КУРЕЙСКОЙ СИНЕКЛИЗЫ В СВЯЗИ С УТОЧНЕНИЕМ НЕФТЕГАЗОГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ

Е. С. Носкова¹, В. А. Спиридонов¹, Г. В. Агафонова^{1,2}

Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт,
Москва, Россия, noskova@vngni.ru

Российский государственный геологоразведочный университет
им. С. Орджоникидзе, Москва, Россия

На северо-западе Сибирской платформы в зоне сочленения надпорядковых структур Байкитской антеклизы (БА) и Курейской синеклизы (КС) [Геология нефти ..., 1981] по результатам геологоразведочных работ, проводимых ФГБУ «ВНИГНИ» на нераспределенном фонде недр, предложена новая модель геологического строения, в которой ключевую роль играет зона регионального Шумихо-Бирамбинского разлома (ЗР), разграничивающая БА и КС.

Комплексный анализ геологических и геофизических материалов показал, что по ЗР субширотного простирания происходит резкое ступенчатое изменение мощностей основных горизонтов, особенностей литологии разреза, изменение структурного положения. Зона проявлена в строении фундамента, что отражают карты потенциальных полей, а также разделяет территории с различными особенностями распределения интрузий граппов – мощностями и уровнями развития.

Вдоль северного ограничения ЗР в верхних горизонтах осадочно-го чехла отмечены ограниченные разломами поднятия – предположительно присдвиговые структуры. Данные бурения скважины Майгуннской 275 и анализа сейсмических профилей позволяют сделать вывод о наличии вдоль регионального разлома ранее не выделявшегося рифейского прогиба, испытывавшего в палеозое инверсию [Филипцов, Старосельцев, 2009].

Таким образом, сделан вывод о тектонической границе между БА и КС по зоне регионального разлома докембрийского заложения, к которому приурочен рифейский прогиб, испытывавший в палеозое инверсию с формированием присдвиговых поднятий вдоль северного ограничения зоны разлома. Поднятия представляют интерес как объекты нефтегазопроисхождения. Границы нефтегазогеологического районирования рекомендовано уточнить в соответствии с предложенной геологической моделью.

Литература

Геология нефти и газа Сибирской платформы / А. С. Анциферов, В. Е. Бакин, И. П. Варламов [и др.]; под ред. А. Э. Конторовича, В. С. Суркова, А. А. Трофимука. М.: Недра, 1981. 552 с.

Филипцов Ю. А., Старосельцев В. С. Рифейские прогибы – основные источники нефти и газа в западной части Сибирской платформы // Геология нефти и газа. 2009. № 6. С. 40–56.

ПРИМЕНЕНИЕ ДИСКРИМИНАНТНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧНОСТИ (ТЕРРИТОРИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН)

Б. С. Нуртаев, О. Г. Цай

Институт геологии и геофизики им. Х. М. Абдуллаева,
Ташкент, Узбекистан, nurtaevb@gmail.com, oksana_tsay@list.ru

В последние годы в сейсмологии большое внимание уделяется применению многомерных статистических методов, среди которых дискриминантный анализ является наиболее эффективным инструментом для моделирования.

В данной работе предлагается методология применения дискриминантного анализа для моделирования сейсмических событий по территории Республики Узбекистан. В среде ArcGIS создана база геоданных и определены семь факторов: плотность кольцевых структур (КС), разломов и узлов линеаментов и ближайшие расстояния от эпицентров сейсмических событий до кольцевых, линейных структур и узлов линеаментов. Расчеты по созданию модели выполнены в SPSS. Зависимая переменная представляет набор номинальных данных, включающий 191 сейсмическое событие (в том числе 140 слабых с магнитудой $4 \leq M < 5$ и 51 сильных – $M \geq 5$), информация по семи факторам использована в качестве независимых переменных (предикторов). Весь набор данных случайным образом разделен на две выборки: 1) обучающую, предназначенную для вычисления дискриминантной функции и создания модели, включающую 123 (64,4 %) наблюдения; 2) тестовую – для проверки результатов модели, в которую вошло 68 (35,6 %) наблюдений.

В результате получена модель, в которой такие факторы, как плотность кольцевых структур и ближайшее расстояние от эпицентра сейсмических событий до кольцевых структур являются значимыми, что подтверждается структурной матрицей и большими величинами дискриминационной способности, составляющими 0,932 и 0,623 соответственно.

Дискриминантная функция имеет следующий вид:

$$D = -4,210 + 0,688 \times \text{gridcode}_{RS} + 0,807 \times \text{Near_Dist}_{RS_F},$$

где D – значение дискриминантной функции; gridcode_{RS} – плотность кольцевых структур; Near_Dist_{RS_F} – ближайшее расстояние от эпицентра сейсмических событий до кольцевых структур.

Данное уравнение предназначено для прогноза принадлежности сейсмических событий к одному из двух классов: слабых с магнитудой $4 \leq M < 5$ и 51 сильному с $M \geq 5$.

Оценка дискриминантной модели показала, что в обучающей выборке правильно классифицированы 70,0 % сейсмических событий с $4 \leq M < 5$ и 63,6 % с $M \geq 5$; в тестовой выборке эти значения составили 64,0 и 61,1 % соответственно. В целом 68,3 % событий из обучающей и 63,2 % из тестовой выборок были правильно классифицированы моделью. В результате получена дискриминантная функция, позволяющая классифицировать сейсмические события с точностью, превышающей 60 %, что позволяет считать данную модель оптимистичной для оценки сейсмичности.

Для повышения точности модели необходимо провести исследование с целью уточнения дополнительных факторов (геоморфологических, геологических, геофизических и др.).

СЕЙСМИЧНОСТЬ, КОНТРОЛИРУЕМАЯ РЕОЛОГИЕЙ ТЕКТОНИЧЕСКИХ РАЗЛОМОВ

А. А. Остапчук

Институт динамики геосфер им. М. А. Садовского РАН,
Москва, Россия, ostapchuk.aa@idg.ras.ru

Динамика скольжения по разломам контролируется особенностями пространственного распределения реологических свойств вдоль плоскости скольжения, в которой выделяют контактные пятна со свойством скоростного разрушения, разделенные областями со свойством скоростного упрочнения.

Сейсмичность, сопровождающая деформационные процессы в разломных зонах, проявляет сложные корреляционные связи во времени, пространстве и по магнитудам. В потоке сейсмических событий выделяют фоновую сейсмичность и связанные кластеры землетрясений. Выделение связанных кластеров землетрясений основано на критериях, предполагающих неслучайное пространственное распределе-

ние, изотропность процесса во времени и степенное магнитудно-частотное распределение землетрясений.

Анализ фоновой сейсмичности показывает, что в окрестностях контактных пятен формируются топологически плотные кластеры – гипоцентры землетрясений. Они проявляются тем очевиднее, чем длительнее время наблюдений. Кластеры, как правило, охватывают 10–20 % плоскости скольжения разлома. И именно в окрестностях топологически плотных кластеров инициируются землетрясения с магнитудой более 5.

Во множестве связанных событий особое внимание уделяется афтершокам. Изучение афтершоковых последовательностей представляет важную информацию о свойствах тектонических разломов и структурных особенностях очаговой зоны основного землетрясения. Пространственное распределение афтершоков очерчивает участок косейсмического разрыва, который останавливается на участке крипа со свойством скоростного упрочнения. Движущим механизмом афтершоков является медленное постсейсмическое скольжение. Наблюдаемая после крупных землетрясений афтершоковая последовательность локализована на границе очага основного землетрясения – разрушенного контактного пятна. Постсейсмическое скольжение, инициирующее афтершоки, характеризуется скоростью 0,1–10 км/день.

Взаимная локализация участков разломов со свойством скоростного упрочнения и разупрочнения сохраняется по крайней мере на протяжении нескольких десятилетий и определяет спектр режимов скольжения (динамический разрыв, события медленного скольжения, асейсмический крип), которые могут быть инициированы на разломе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-77-10087).

ФЛЮИДОГЕОДИНАМИКА И ЕЕ СВЯЗЬ С ТЕКТОНИКОЙ: ФОРМИРОВАНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ «СТОЛБОВ» В ОСАДОЧНЫХ БАССЕЙНАХ

С. Х. Павлов

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия,
spavlov@crust.irk.ru

Флюидогеодинамика – раздел геологической науки, в котором движение флюидов (водные растворы, газы, нефть), тектогенез, литологические и геохимические изменения, в том числе связанные с формированием как жидких, так и твердых полезных ископаемых, рассматриваются как единый процесс. Подземные флюиды, являясь активными агентами геотектоники, служат одной из причин формирования мелких и средних по размерам складок антиклинального типа, а также трещин и разломов. Это дает возможность в определенных ситуациях ответить на вопрос: что первично – трещины по отношению к движущимся в них флюидам или флюиды по отношению к трещиноватости? Нередко встречаются разломы, являющиеся своеобразными природными гидроразрывами.

Выявление афациальных зон минерализации в виде своеобразных «столбов», обогащенных ломонтитом, каолинитом и карбонатами, послужило основанием для увязывания их происхождения с тектоно-гидротермальными процессами и включения в число поисковых признаков обнаружения скоплений углеводородов. Такое строение геологического разреза тесно связано с инверсией гидрогеохимической зональности – уменьшением минерализации подземных вод в глубоких горизонтах и преобразованием состава подземных вод с хлоридного кальциевого типа на гидрокарбонатный натриевый с различными переходными разностями.

Многочисленные исследователи различных направлений геологической науки [Киреева, 2018; Коробов, Коробова, 2018; Розин, Сердюк, 1970; и др.], рассматривающие это явление с разных позиций, едины в одном – оно связано с поступлением по зонам разломов углекислоты из фундамента. В данной работе на основе количественных исследований процессов физико-химических взаимодействий в системе *вода – порода – газ – органическое вещество* предпринята попытка внести определенные пояснения системного характера на происхождение различных компонентов, участвующих в обсуждаемом явлении.

Исследование проведено с помощью программного комплекса Селектор [Карпов, 1981] с различным содержанием в породе (мас. %) органического вещества ($C_{орг}$ от 1 до 5), каждой величине которого соответствовали два значения хлора ($Cl = 0,22$ и $0,49$).

Установлено, что отмеченные выше компоненты минеральной ассоциации, гидрокарбонатные натриевые (инверсионные) воды с высоким содержанием углекислоты и метана в растворе и в газовой фазе формируются внутри системы *вода – порода – газ – органическое вещество* без привлечения их из внешних источников как на площади месторождений углеводородов, так и вне их в результате активно протекающих процессов гидrolитического диспропорционирования органического вещества.

Литература

Карпов И. К. Физико-химическое моделирование на ЭВМ в геохимии. Новосибирск : Наука, 1981. 247 с.

Киреева Т. А. Эволюция глубинного флюида как основа прогноза нефтеносности фундамента // Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. Т. 23, № 4. С. 1–10.

Коробов А. Д., Коробова Л. А. «Каолинитовые» и «цеолитовые столбы» Западной Сибири – новые ориентиры обнаружения месторождений нефти и газа // Недра Поволжья и Прикаспия. 2018. Т. 14, № 5. С. 18–40.

Розин А. А., Сердюк З. Я. Преобразование состава подземных вод и пород Западно-Сибирской плиты под воздействием глубинного углекислого газа // Литология и полезные ископаемые. 1970. № 4. С. 102–113.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ РАЗЛОМНЫХ ЗОН НА ЛАБОРАТОРНОМ МАСШТАБЕ: ПОДХОДЫ, МЕТОДЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ

**И. А. Пантелеев¹, С. А. Борняков², А. Н. Вшивков¹,
В. И. Окунев³, В. А. Новиков³**

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия, ria@icmm.ru

²Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

³Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

Настоящий доклад носит обзорный характер и посвящен исследованию особенностей формирования и развития модельной разломной зоны в лабораторном эксперименте с использованием современных методов регистрации полей различной природы и методов неразрушающего контроля. В качестве объектов исследования рассматриваются: граница раздела между двумя жесткими упругими блоками с мелкодисперсным заполнителем и залеченная граница раздела в упруговязкопластическом материале.

В экспериментах на модифицированной слайдер-модели (ОИВТ РАН, Москва) разлом представляет собой зону контакта между протяженным (длина в 5,6 раза превышает ширину блока) блоком и неподвижным основанием, заполненную мелкозернистым речным песком. Блок большой длины позволяет смоделировать неравномерный контакт с поверхностью и проследить во времени эволюцию зон активного скольжения. Для регистрации локальных деформационных процессов в заполнителе между подвижным блоком и основанием при подготовке и реализации динамических подвижек использован метод акустической эмиссии. В результате проведенной серии экспериментов показано, что в процессе прерывистого скольжения акустико-эмиссионная активность локализована в нескольких пространственных областях. Установлено, что инъекция воды в контактную зону вызывает акустико-эмиссионную активность, локализованную у точки ввода. Показано, что воздействие электрического тока вызывает рост акустико-эмиссионной активности во всей области между электродами, за исключением области инъекции воды.

Эксперименты по инициированию подвижки в упруговязкопластической модели литосферы проводились на специализированном стенде (ИЗК СО РАН, Иркутск), представляющем две кюветы, размещенные на подвижных независимых платформах, свободно перемещающихся по направляющим. Вертикальный контакт между материалами, размещенными в кюветах, представляет собой модельный разлом. Для изучения процесса подготовки и реализации подвижки по модельному разлому были использованы два метода неразрушающего контроля: лазерной дальнометрии и корреляции цифровых изображений. Первый позволяет контролировать интегральное смещение кювет относительно друг друга, второй – восстанавливать поле смещений и деформаций на поверхности модельной среды в окрестности модельного разлома.

В результате проведенных экспериментов на основе анализа данных об интегральном смещении двух блоков модельного материала выявлены четыре характерных стадии процесса подготовки подвижки. В результате анализа оптических изображений свободной поверхности деформируемого модельного материала методом корреляции цифровых изображений выявлены пространственные особенности развития окрестности модельной разломной зоны на первых двух стадиях. Так, было установлено, что по простираанию модельного разлома выделяются как области избытка, так и области дефицита продольного смещения. Наличие этих областей вызвано деформацией контактной зоны модельного разлома, ее искривлением и формированием зоны внедрения материала одного блока в материал второго блока.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 19-77-30008.

ПОРОУПРУГИЙ ОТКЛИК ГЕОСРЕДЫ НА ПРОХОЖДЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН КАК ИНСТРУМЕНТ ОЦЕНКИ ОРИЕНТАЦИИ ТРЕЩИНОВАТОСТИ В РАЙОНЕ АКТИВНОЙ РАЗЛОМНОЙ ЗОНЫ

И. А. Пантелеев¹, В. Ляховский², Э. Шалев²

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия,
pia@icmm.ru

²Geological Survey of Israel, Jerusalem, Israel

Изучение многочисленных проявлений гидрогеосейсмических вариаций в изменениях давления, разгрузки, температуры и химического состава подземных вод и газов при вибрационном воздействии сейсмических волн на подземные водоносные системы является одним из магистральных направлений исследования последствий сильных и средних землетрясений в сейсмоактивных регионах мира. На основе многочисленных лабораторных экспериментов было предложено уравнение Скемптона, согласно которому вариация порового давления в недrenированных условиях флюидонасыщенного коллектора может быть вызвана как вариацией объемной, так и сдвиговой деформации. Авторами было высказано предположение о том, что коэффициент пропорциональности между поровым давлением и сдвиговой деформацией должен быть чувствительным к ориентации трещиноватости в коллекторе в районе активной разломной зоны, а сама ориентация определяется кинематикой этой зоны. Проверке сформулированной гипотезы посвящена настоящая работа.

На основе оригинальной нелинейной реологической модели формирования структурно-неоднородных сред предложено обобщение уравнения Скемптона для недrenированного состояния трещиноватой породы, определяющего связь порового давления флюида с величиной ее объемной и сдвиговой деформации, на случай зависимости коэффициентов уравнения от компонент тензора поврежденности второго ранга. Введение тензора поврежденности, с одной стороны, позволяет описать преимущественную ориентацию трещиноватости породы и индуцированную ею анизотропию механических свойств и, с другой стороны, дает возможность напрямую связать величину изменения порового давления, вызванного прохождением сейсмических волн, с их азимутом.

В результате проведенных численных экспериментов показано, что все возможные сценарии отклика порового давления флюида в районе активной разломной зоны на прохождение сейсмических волн

определяются взаимной ориентацией сдвиговой разломной зоны, микротрещиноватости в ее окрестности и осей максимального и минимального горизонтальных напряжений, действующих во флюидонасыщенном коллекторе.

Для верификации обобщенного уравнения Скемптона использованы комплексные данные скважинного мониторинга резервуара сброса сточных вод Арбакл (Оклахома, США) (Arbuckle wastewater disposal reservoir, Oklahoma, USA) [Barbour, Beeler, 2021], реализуемого Американской геофизической службой. Показано, что наблюдаемое разнообразие отклика порового давления в скважинах, расположенных в окрестностях разломной зоны, пересекающей резервуар, на прохождения сейсмических волн от разноудаленных сейсмических событий с высокой точностью описывается разработанной моделью.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 19-77-30008.

Литература

Barbour A. J., Beeler N. M. Teleseismic waves reveal anisotropic poroelastic response of waste water disposal reservoir // Earth Planet. Phys. 2021. Vol. 5. eep2021034.

НЕКОТОРЫЕ ЭФФЕКТЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Н. П. Первалова¹, А. А. Добрынина^{2,3}, В. А. Саньков²

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия,
pereval@iszf.irk.ru

²Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

³Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Россия

Сейсмические процессы являются источником различных эффектов не только в литосфере, но и в различных слоях атмосферы и гидросферы. Одной из основных современных концепций воздействия землетрясений на атмосферу и ионосферу Земли является теория генерации акустико-гравитационных волн (АГВ) при вертикальных смещениях земной поверхности или дна океана в эпицентральной области, а также при распространении сейсмических волн Рэлея и волн цунами. Достигая высоких, ионизованных солнечным излучением слоев атмосферы (ионосферы), АГВ вызывают возмущения ионосферной плазмы, которые могут регистрироваться радиофизическими методами, в том числе с помощью глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) GPS и ГЛОНАСС. По измерениям радиосигналов ГНСС регистрируется полное электронное содержание (ПЭС) в ионосфере вдоль

луча *приемник – спутник*, которое отражает поведение электронной концентрации и ее изменения из-за различных причин. Зондирование ионосферы с помощью сетей наземных приемников ГНСС позволяет регистрировать ионосферные возмущения, вызванные землетрясением, оценивать их скорость и положение источника.

Авторами по данным ГНСС проведен анализ отклика ионосферы на большое количество (более 20) землетрясений с магнитудами 4,1–9,0, зарегистрированных в различных областях земного шара (в том числе в Байкальском регионе). Установлено наличие порогового значения магнитуды $M_w \sim 6,5$, ниже которого заметных волновых возмущений ПЭС, вызванных землетрясением, не наблюдается. При малых магнитудах сейсмической энергии, очевидно, недостаточно для возбуждения в нейтральной атмосфере волн, которые могут достичь высот ионосферы и вызвать возмущения ПЭС, различимые на уровне фоновых флуктуаций.

Отклики ПЭС на умеренные землетрясения ($6,5 \leq M_w < 7,0$), как правило, имеют небольшую амплитуду, их трудно выделять на уровне фоновых колебаний. Возмущения наблюдаются на расстояниях 200–900 км от эпицентров.

Во время сильных землетрясений с $M_w \geq 7,0$ возмущения ПЭС имеют большую интенсивность и регистрируются как вблизи от эпицентра, так и на больших расстояниях (до 6000–8000 км) от него. Сильные землетрясения вызывают образование спектра волновых ионосферных возмущений с длинами волн от 200 до 600 км и скоростями от 150 до 3000 м/с. В спектре волн можно выделить три основные моды: быструю (скорость 2000–3000 м/с, обусловлена волнами Рэлея); акустическую (600–1000 м/с, связана с акустическими волнами, инициированными в атмосфере основным толчком); медленную (150–400 м/с, соответствуют гравитационным волнам, вызванным основным толчком или цунами). Отмечена тенденция увеличения средней амплитуды отклика ПЭС на сильные землетрясения с ростом магнитуды. Показано, что отклики более ярко выражены для землетрясений, имеющих существенную вертикальную составляющую в очаге. Это свидетельствует о том, что фокальный механизм также оказывает влияние на формирование и интенсивность волновых возмущений в ионосфере, вызванных землетрясением.

СИЛЬНЕЙШИЕ АФТЕРШОКИ В АФТЕРШОКОВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯХ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

Н. А. Радзиминович, Е. Д. Иванушкин

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия,
nradzim@crust.irk.ru

Изучение афтершоков позволяет лучше понять процессы разрывообразования и релаксации напряжений в земной коре. Анализ афтершоков также важен в прикладном аспекте, поскольку повторные толчки, особенно сильные, могут приводить к разрушениям, тем более в случаях повреждения зданий при главном толчке.

В данной работе анализировались сильнейшие афтершоки в выделенных последовательностях из каталога землетрясений Байкальской рифтовой зоны (выпускаемого в настоящее время Байкальским филиалом ФИЦ ЕГС РАН). Декластеризация проводилась с использованием программы В. Б. Смирнова [2009] по алгоритму из работы [Молчан, Дмитриева, 1991]. В качестве главных толчков тестировались землетрясения с $Kp \geq 12,5$, афтершоки которых составили примерно 25 % всех событий в каталоге [Радзиминович, Очковская, 2013].

Оценивались разница в энергетическом классе между главным толчком и сильнейшим афтершоком, время и расстояние между ними.

Разность между магнитурами главного толчка и сильнейшего афтершока определяется законом Бота [Bath, 1965], который определяет ее как величину постоянную ($\Delta M \approx 1,2$). Для землетрясений Байкальской рифтовой зоны эта разница несколько выше (с учетом соотношения *класс – магнитуда*) и варьирует в достаточно широком диапазоне (до 6 единиц класса) при среднем значении $\Delta K \approx 3,2$. Для самых сильных событий (с $K \geq 14,0$) энергетическая ступень ниже. Среди анализируемых серий в 55 % случаев сильнейший афтершок происходил в первые сутки после главного толчка, при этом в четверти случаев – в течение часа после него.

Дальнейший анализ предполагает оценку распределения разности магнитуд (классов) главного толчка и сильнейшего афтершока от времени, следуя введенному в [Баранов, Шебалин, 2018] динамическому характеру этого распределения.

Литература

Баранов С. В., Шебалин П. Н. О прогнозировании афтершоковой активности. 3. Динамический закон Бота // Физика Земли. 2018. № 6. С. 129–136.

Молчан Г. М., Дмитриева О. Е. Идентификация афтершоков: обзор и новые подходы // М. : Вычислительная сейсмология. Вып. 24. 1991. С. 19–50.

Радзиминович Н. А., Очковская М. Г. Выделение афтершоковых и роевых последовательностей землетрясений Байкальской рифтовой зоны // Геодинамика и тектонофизика. 2013. Т. 4, № 2. С. 169–186. DOI: 10.5800/GT-2013-4-2-0096

Смирнов В. Б. Прогностические аномалии сейсмического режима. I. Методические основы подготовки исходных данных // Геофизические исследования. 2009. Т. 10, № 2. С. 7–22.

Bath M. Lateral inhomogeneities in the upper mantle // Tectonophysics. 1965. Vol. 2. P. 483–514.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ЭПИЦЕНТРАЛЬНЫХ ЗОН ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И РАЗЛОМОВ

Н. А. Радзиминович^{1,2}, В. А. Саньков¹

¹Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия, radzim@crust.irk.ru

²Бурятский филиал ФИЦ ЕГС РАН, Улан-Удэ, Россия

По общепринятому мнению, линейно вытянутые зоны эпицентров трансформируют активный разлом и служат основанием для его картирования. В случае субвертикального падения разлома (наиболее характерного для разрывов сдвиговой кинематики) эпицентры фактически совпадают с закартированным выходом разлома на поверхность, однако при наклонном или пологом положении плоскостей смещения распределение эпицентров как проекции гипоцентров на земную поверхность может носить менее концентрированный характер и представлять собой более широкую полосу, отстоящую от условной линии разлома на карте. Для Байкальской рифтовой зоны с узкими впадинами, где бортовые и внутривпадинные разломы расположены достаточно близко, а имеющаяся точность определения гипо- и эпицентров недостаточна, соотносить эпицентральные зоны с конкретными разломами – проблематичная задача. Между тем это необходимо для оценки геометрических и кинематических характеристик разломов и сейсмической опасности в целом. В качестве примера можно упомянуть катастрофическое Цаганское землетрясение 1862 г. с $M \sim 7,5$, которое привело к 8-балльным сотрясениям в г. Иркутске, но до сих пор нет единого мнения о том, какая структура, находящаяся поблизости от крупных населенных пунктов Прибайкалья и Забайкалья, способна генерировать толчки с $M \geq 7$.

В докладе рассматриваются вопросы сопоставления эпицентральных зон землетрясений и выделенных или предполагаемых разломов для Южно-Байкальской впадины, крупнейшей впадины Байкальской рифтовой зоне, которая характеризуется наибольшей мощностью кай-

нозойских отложений, что затрудняет выделение разломов в фундаменте. Карты разломов, построенные по результатам сейсмического профилирования [Активная тектоника Байкала, 1995], так же как и батиметрические данные высокого разрешения, отражают главным образом разрывные нарушения в осадочной толще [Разломные зоны ... , 2022], тогда как очаги байкальских землетрясений приурочены к фундаменту [Radziminovich, 2022]. Попытка учесть распределение эпицентров была сделана при построении карты разломов в работе [Лунина, Гладков, Шерстянкин, 2010].

Ранее в Южно-Байкальской впадине нами было выделено 20 эпицентральных зон [Радзиминович, 2019]. Мы представляем анализ сейсмологических данных, характеризующих эти зоны, с целью определения параметров контролирующих их разломов.

Литература

Активная тектоника Байкала / К. Г. Леви, С. М. Бабушкин, А. А. Бадардинов [и др.] // Геология и геофизика. 1995. Т. 36, № 10. С. 154–163.

Лунина О. В., Гладков А. С., Шерстянкин П. П. Новая электронная карта разломов юга Восточной Сибири // Доклады Академии Наук. 2010. Т. 433, № 5. С. 1–6.

Радзиминович Н. А. Сейсмоактивные структуры Южно-Байкальской впадины / Современная тектонофизика // Методы и результаты : материалы VI молодеж. тектонофиз. школы-семинара, 7–12 окт. 2019 г., Институт физики Земли РАН. М., 2019. С. 199–204.

Разломные зоны и поля напряжений в осадках центрального Байкала: тектонофизическая интерпретация гидроакустических и геофизических данных / К. Ж. Семинский, А. С. Черемных, О. М. Хлыстов [и др.] // Геология и геофизика. 2022. Т. 63, № 7. С. 1016–1034.

Radziminovich N. A. Earthquake Depth Frequency Distribution in the Baikal Rift System // Pure Appl. Geophys. 2022. N 179. P. 619–639.

ИМПУЛЬСНАЯ СКОЛЬЗЯЩАЯ АКТИВИЗАЦИЯ ЛИТОСФЕРЫ ОТ ВИТИМО-УДОКАНСКОЙ ЗОНЫ УГЛОВОЙ ГОРЯЧЕЙ ТРАНСТЕНСИИ К ВПАДИНАМ ОЗ. БАЙКАЛ

**С. В. Рассказов^{1,2}, И. С. Чувашова^{1,2},
Е. П. Чебыкин^{1,3}, А. М. Ильясова¹**

¹Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия, rassk@crust.irk.ru

²Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

³Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия

Образование кулисообразной системы впадин на северо-востоке Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) объяснялось С. И. Шерманом и К. Г. Леви вращением Сибирской и Забайкальской плит относительно эйлера полюса, расположенного на плато Путорана. Ими предполагалась передача движений между раздвиговыми Северо-Байкальской и Чарской впадинами по единой системе кулис Муйско-Чарского разло-

ма, а образование Баргузинской и Ципа-Баунтовской впадин связывалось с активностью Байкало-Чарского разлома. Эти построения, однако, не были увязаны с эволюцией кайнозойского вулканизма.

В северо-восточной части Байкальской рифтовой системы (БРС) сочетаются Ципа-Муяканский, Рель-Верхнеангарский и Муя-Удоканский сегменты. Правосторонний трансензионный Ципа-Муяканский сегмент простирается субмеридионально с небольшим ССВ отклонением. Левосторонние трансензионные Рель-Верхнеангарский и Муя-Удоканский сегменты протягиваются в субширотном направлении. Удоканский и Витимский вулканические ареалы находятся на окончаниях Муя-Удоканского и Ципа-Муяканского сегментов. В последние 16 млн лет вулканизм Витимского и Удоканского полей проявлялся в противофазе в связи с сопряженной активностью Ципа-Муяканского и Муя-Удоканского трансензионных сегментов, представляющих единую горячую угловую Витимо-Удоканскую трансензионную структуру. Вулканические импульсы передавались от оси Японско-Байкальского геодинамического коридора (ЯБГК) к его периферии (от Витимского вулканического поля к Удоканскому вдоль зоны угловой трансенсии) с квазипериодичностью 2,5 млн лет, соответствующей великим циклам эксцентриситета орбитального вращения Земли.

Кроме горячей Витимо-Удоканской зоны, в северо-восточной и центральной частях БРС образовались авулканичные угловые зоны трансенсии: Верхне-Ангарско-Северо-Байкальская и Баргузин-Ольхонская. Импульсы активности Витимо-Удоканской зоны передавались в пространственно-сопряженные структуры. Вместе с Муя-Удоканским сегментом эпизодически вовлекался в движения Верхне-Ангарский сегмент. Через Тыйский угол тектоническая активизация передавалась в Северо-Байкальскую впадину. Между Витимскими структурами осевой части ЯБГК и Северо-Байкальской впадиной возник диссонанс, на фоне которого получила развитие ССВ цепочка впадин Баргузинской долины. Через угол юга Баргузинской долины деформации передавались вдоль Ямбуйского трансензионного сегмента в акваторию Байкала до о. Ольхон. По отношению к действующим силам ЯБГК Витимо-Удоканская зона угловой трансенсии имела фронтальное положение, Верхне-Ангарско-Северо-Байкальская – тыловое, Баргузин-Ольхонская – среднее. Две первые генерировались силой затягивания от периферии к оси ЯБГК, последняя вызывалась силой, имеющей обратную направленность от Баргузинской долины к Северо-Байкальской впадине. Очередной, зарождающийся в Витимской структуре ЯБГК импульс, диссонировал с запаздывающим, достигавшим опосредованным путем структур Среднего Байкала.

Импульсный характер скользящей позднекайнозойской активизации литосферы в структурах северо-востока БРС находит отражение в распределении современных гидротерм и сейсмичности.

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОРОД МЕСТОРОЖДЕНИЯ МАРДЖАНБУЛАК ПРИ РУДООБРАЗОВАНИИ

Ш. Д. Рахматуллаева¹, Н. Ш. Туляганова²

¹ГУ «Геолфонды» Министерства горной промышленности и геологии Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан,
nargiza.tulyaganova@mail.ru

²Ташкентский государственный технический университет,
Ташкент, Узбекистан

Как известно, многие месторождения полезных ископаемых или их отдельные участки, а также рудоносные зоны уже не существуют в связи с их активной разработкой. К числу таких объектов можно отнести и месторождение золота Марджанбулак, где отработан ряд участков, однако роль структур в размещении оруденения и вопросы перспектив месторождения остаются до конца не раскрытыми. Успешное решение актуальных проблем месторождения Марджанбулак, где приоритетным является увеличение его запасов, во многом зависит от усовершенствования традиционных методов исследований и комплексирования их с космогеологическими, тектонофизическими методами. Особое место занимают тектонофизические методы, позволяющие установить механизм образования и развития геологических структур и оценить их физическое состояние в процессе структурообразования. Первостепенное значение в экспериментальной тектонике имеет вопрос напряженно-деформированного состояния земной коры, в рудной геологии он важен для восстановления механизма образования рудоконтролирующих структур, определения взаимосвязи оруденения с характером поля напряжений и деформаций для повышения эффективности прогнозно-поисковых работ. В настоящее время проблема реконструкции напряженно-деформированного состояния периода рудообразования является актуальной задачей для многих рудных месторождений мира, в том числе Узбекистана.

В структурно-тектоническом строении Марджанбулакского месторождения, кроме северо-восточных разрывных нарушений, выделяется система северо-западных разломов. Поперечные северо-восточные

разломы не оказывают существенного влияния на рудообразование. Ряд рудопроявлений формировался в зоне пересечения северо-западных структур с северо-восточными.

Анализируя данные моделирования напряжений в структурах месторождения, можем отметить сходство напряженно-деформированного состояния модели как в дорудный период, так и во время рудообразования. Площадь севернее Северной зоны остается тектонически ослабленной. Породный массив на юге от Южной зоны находится в условиях интенсивного напряженного состояния. Для участков сопряжений и пересечений Южной зоны другими структурами характерно повышение напряжений до существенных величин, но площадь их развития незначительна. Центральный участок месторождения является тектонически разгруженным с мозаичным распределением напряжений от нетральных до умеренных величин. С внесением в модель элементов, имитирующих северо-восточные разломы, существенных изменений в тектонофизическом состоянии площади Марджанбулакского месторождения не наблюдается. Рудоконтролирующие разломы под воздействием региональных горизонтальных усилий сжатия, несмотря на их осложнение поперечными структурами, активизировались. Анализ геолого-структурных и экспериментальных данных свидетельствует о тектонической активности рудоконтролирующих структур в до- и внутрирудный периоды в режиме сдвига.

В целом результаты тектонофизических исследований Марджанбулакского месторождения периода рудообразования показывают, что южная территория тектонически более активна, чем северная. Активность разломов определила характер распределения напряжений и изменения деформации. Тектоническая активность разломов способствует дроблению пород в их зоне. Наиболее интенсивно они наблюдаются в участках искривления, сопряжения и пересечения разломов. Характер структурообразования в комплексе с физико-механическими свойствами и литологическим составом вмещающих образований обуславливают повышение проницаемости пород, что является весьма благоприятным условием для миграции гидротермальных рудоносных растворов.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КОРОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ОРОГЕНАХ И АКТИВНЫХ КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ОКРАИНАХ

Ю. Л. Ребецкий

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

Результаты многолетних исследований напряженного состояния континентальных орогенов и зон субдукции позволил выявить ряд важнейших закономерностей.

Установлено, что если морфология горных поднятий отвечает хребтам, чаще всего существуют режимы горизонтального сжатия, а иногда горизонтального сдвига. Оси максимального сжатия всегда субгоризонтальны и, как правило, ориентированы ортогонально простиранию хребтов.

Для плоской формы рельефа горного поднятия, плато и нагорья, в коре наблюдается режим горизонтального растяжения, а иногда горизонтальный сдвиг. Оси минимального сжатия всегда субгоризонтальны. Для коры щитов также имеет место режим горизонтального сжатия.

Напряженные состояния коры крупных межгорных впадин и передовых прогибов представлены режимами горизонтального сдвига или горизонтального растяжения, для которых ось главного девиаторного растяжения субгоризонтальна.

В коре внутригорных впадин, вовлеченных в поднятия, как правило, имеет место режим горизонтального сдвига. Для коры платформ – горизонтального сдвига или горизонтальное растяжение. Для зон субдукции установлено, что в коре континентального склона оси максимального сжатия погружаются под океанскую литосферную плиту, а минимального субвертикальны (режим горизонтального сжатия). В океанической литосферной плите вблизи желоба максимальное сжатие субвертикально, а минимальное сжатие субгоризонтально и ортогонально желобу (режим горизонтального растяжения). На границе контакта континентальной и океанской плит поддвиговые касательные напряжения направлены от океана к континенту. В глубинной части погруженной океанской плиты (60–100 км) почти всегда имеются участки, для которых вдоль ее погружения действуют напряжения максимального сжатия.

Средний уровень девиаторных напряжений в коре зон субдукции около 50–70 бар (5–7 МПа), а тектоническое давление на 1–5 % больше литостатики. Средний уровень девиаторных напряжений в коре внутриконтинентальных орогенов около 500–900 бар (50–90 МПа), а тектоническое давление варьируется в широком диапазоне 60–150 % от литостатики.

О ДВУХ МЕХАНИЗМАХ ГЕНЕЗИСА НАПРЯЖЕНИЙ ВЫСОКОГО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО СЖАТИЯ В КОРЕ КОНТИНЕНТАЛЫХ ОРОГЕНОВ

Ю. Л. Ребецкий

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

Предлагается рассматривать процессы денудации поверхности и вулканизма/магматизма коры для объяснения появления в ней повышенных напряжений горизонтального сжатия, избыточных по отношению к литостатическому давлению.

«Откапывание» породы, которое происходит на склонах хребтов в орогенах альпийского типа, приводит только к частичной ее разгрузке, за счет снятия веса вышележащих пород, если она на большой глубине достигла предела текучести. Это связано с тем, что в случае «откапывания» разгрузка идет по упругому закону. Из-за этого в породе возникают остаточные напряжения горизонтального сжатия, полученные на стадии катакластического течения. В этом случае наибольшие величины напряжения дополнительного сжатия возникают в тех породах, находящихся в настоящее время на поверхности, которые ранее были на глубине. Результатом этого механизма формирования напряжений дополнительного горизонтального сжатия становится создание в верхних слоях коры режима горизонтального сжатия.

Другой механизм формирования дополнительных сжимающих напряжений в коре связан с процессами вулканизма и магматизма. Подъем магмы по субвертикальным разломам и системам трещин возможен только в условиях, когда во фронте распространения ее давление превышает уровень горизонтального сжатия пород. Поэтому самым благоприятным начальным напряженным состоянием для вулканизма является режим горизонтального растяжения. В случае действия в коре начального напряженного состояния горизонтального сдвига

магмопроводящие разломы должны располагаться вдоль осей наибольшего горизонтального сжатия.

Давление магмы в подкоровом или внутрикоровом магматическом очаге близко к литостатическому давлению вышележащих пород. По мере поднятия магмы по разлому ее давление падает на величину веса столба до магматического очага. Таким образом, давление магмы в достаточно широком диапазоне глубин превышает уровень напряжений горизонтального сжатия начального состояния. Ниже фронта ее распространения уровень напряжений горизонтального сжатия в породах повышается до уровня ее давления. Таким образом, распространяясь вверх до поверхности, магма повышает уровень горизонтального сжатия в направлении, нормальном к магмопроводящему разлому, до надлитостатического значения. Таким образом, магматизация способна изменить в коре режим напряженного состояния горизонтального растяжения на горизонтальный сдвиг.

АНАЛИЗ ВЗАИМНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ РАЗЛОМОВ, ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ НА ПРИМЕРЕ РЯДА РЕГИОНОВ

**М. В. Родкин^{1,2}, М. Ю. Андреева², Т. В. Прохорова¹,
Т. А. Рукавишникова¹**

¹Институт теории прогноза землетрясений
и математической физики РАН, Москва, Россия, rodkin@mitp.ru

²Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН,
Южно-Сахалинск, Россия

Проблема взаимного расположения разломов, землетрясений и месторождений, в частности углеводородных (УВ), представляет значительный теоретический и практический интерес. Проблему взаимосвязи разломов и землетрясений принято трактовать как дилемму курицы и яйца. Считается, что сильные землетрясения происходят на разломах, самые сильные – в зонах их пересечения, слабые распределены по площади, их вероятность в некоем полигоне при оценке сейсмической опасности полагается фиксированной. Характер хорошо изученной сейсмичности Калифорнии весомо подкрепляет такие представления [Кочарян, 2016].

Согласно положениям классической осадочно-миграционной модели, условием образования месторождения является наличие изолирующей крышки, обеспечивающей сохранность отжимаемых вверх

по разрезу легких углеводородов и их концентрацию под куполами таких покрывок. Отсюда скорее следует ожидать размещения УВ месторождений в стороне от разломов. Согласно альтернативной абиогенной концепции, условием образования УВ месторождений является их концентрирование при подъеме по повышенно проницаемым зонам глубинных разломов. Компромиссную позицию занимают флюидогенная модель нефтегенеза [Соколов, 1996] и модель области активного нефтегенеза как неравновесного проточного реактора [Родкин, 2004]. В обеих основным источником вещества для нефтегенеза полагается органика, но важная роль отводится развитию интенсивных восходящих флюидных потоков. В [Родкин, 2004] такое развитие связывается с подъемом слабоминерализованных молодых вод – продуктов дегидратации в глубинных частях зон надвигов и в зонах прогибания.

Средствами ГИС анализировались данные по взаимному расположению зон разломов, землетрясений и УВ месторождений для Сахалина, района добычи сланцевых углеводородов в Оклахоме и Большого Кавказа. Для области Оклахомы использовались также данные по расположению скважин. Во всех случаях анализировались эмпирические функции распределения от точечного объекта (землетрясения, месторождения, скважины) до ближайшего разлома. Для случая сейсмичности Сахалина получено, что функции распределения расстояний для диапазонов сильных и слабых землетрясений статистически близки; отсюда вывод, что сильные события приурочены к разломам, а слабые имеют площадное распределение, может иметь и чисто статистическое объяснение в различии числа сильных и слабых землетрясений. Также можно сделать вывод о том, что получаемые функции распределения для расстояний до разломов для землетрясений и УВ месторождений (естественно, с некоторой нормировкой) близки.

Литература

- Кочарян Г. Г. Геомеханика разломов. М. : ГЕОС, 2016. 424 с.
Родкин М. В. Происхождение нефти: старый спор – новые аргументы // Наука в России. 2004. № 5. С. 29–33.
Соколов Б. А. Флюидодинамическая модель нефтегазообразования // Вестник Московского университета. Серия 4, Геология. 1996. № 4. С. 28–36.

О ВЫЯСНЕНИИ МЕХАНИЗМОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЗАБЛОКИРОВАННЫХ СЕГМЕНТОВ РАЗЛОМОВ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СРЕДНЕСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И УТОЧНЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

В. В. Ружич, Е. А. Левина

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия
ruzich@crust.irk.ru

В кратком изложении представлены результаты многолетних работ, проведенных на территории Байкальской рифтовой зоны специалистами научно-исследовательских учреждений РАН и СО РАН России, направленных на поиск путей к более надежному обеспечению сейсмической безопасности. В рамках сотрудничества проводилось изучение условий возникновения очагов землетрясений с применением нескольких методов: геолого-геофизического обследования эксгумированных фрагментов очагов палеоземлетрясений в Прибайкалье и Монголии, численного моделирования, натуральных экспериментов на участках разломов. Анализ полученных сведений показал, что возникновение сильных землетрясений готовится вследствие эпизодических актов динамического разрушения крупномасштабных неровностей (asperities), при контактном взаимодействии которых происходило возникновение временно заблокированных (запертых) сегментов разломов. На основании учета всей совокупности результатов, полученных при проведении тектонофизических экспериментов в разломах, исследований в сфере средне- и долгосрочного прогноза землетрясений в Байкальской рифтовой зоне (БРЗ) установлено, что на участках временно заблокированных сегментов разломов возникают сейсмические бреши. Их выявление – распознавание мест подготовки очагов землетрясений – является одним из главных поисковых критериев средне- и долгосрочного прогнозов [Ружич, Левина, 2022]. Согласно оценкам известных соотношений L/M , т. е. протяженности бреши и потенциальной магнитуды, появляется возможность количественно оценить энергию ожидаемых землетрясений в значениях M_{\max} . В докладе приведен пример уточнения сейсмической опасности и сейсмического риска по отношению к г. Ангарску, удаленному на 100 км от зоны Главного Саянского разлома, в зоне которого выявлен сегмент с сейсмической брешью. В соответствии с выявленным размером бреши $L \approx 60$ км были по известным уравнениям для соотношений L/M (Ризиченко, 1976; Leonard, 2010) рассчитаны оценки энергетического по-

тенциала, которые соответствуют значениям $M_{\max} = 7,8$ и $7,1$ [Оценка социальных ... , 2022]. С учетом подобных построений можно уточнять оценки интенсивности сейсмических сотрясений, уровня сейсмической опасности, а также вероятность возникновения землетрясений за периоды ожидания 10–50 лет [Ружич и др., 2023].

Литература

Оценка социальных и экономических показателей сейсмического риска на примере г. Ангарска / Н. И. Фролова, Н. С. Малаева, В. В. Ружич [и др.] // Геофизические процессы и биосфера. 2022. Т. 21, № 2. С. 86–113. DOI: 10.21455/GPB2022.2-5

Ружич В. В., Левина Е. А., Бержинская Л. П. Об использовании данных среднесрочного прогноза для Байкальской рифтовой зоны при оценках сейсмической опасности // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: материалы и докл. III Всерос. конф., 25–26 окт. 2023 г. М.: ИТПЗ РАН, 2023. С. 229–233.

Ружич В. В., Левина Е. А. О разработке сейсмогеологического подхода к среднесрочному прогнозу землетрясений в Байкальской рифтовой зоне // Динамические процессы в геосферах. 2022. № 1. С. 11–28. DOI: 10.26006/22228535_2022_14_1_17

РАЗЛОМНО-БЛОКОВОЕ СТРОЕНИЕ УЙМОНСКОЙ ВПАДИНЫ ГОРНОГО АЛТАЯ ПО ДАННЫМ ГЕОЭЛЕКТРИКИ

А. М. Санчаа, Н. Н. Неведрова, З. Я. Кузина

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН
Новосибирск, Россия, SanchaaAM@ipgg.sbras.ru

Уймонская впадина является одной из крупнейших и при этом наименее изученных заселенных межгорных впадин Горного Алтая (до 2011 г. геофизических работ там не проводилось). Вероятно, это связано с тем, что она, в отличие от Чуйской и Курайской впадин, находится в стороне от основной дорожной магистрали (Чуйского тракта) и отделена от нее сложным горным перевалом. Поскольку Горный Алтай относится к территориям высокой сейсмоопасности, важно выделение возможных сейсмогенерирующих разломных структур для корректного сейсморайонирования.

Полевые работы в Уймонской впадине методами наземной электроразведки были начаты в 2011 г. и включали измерения методами зондирования становлением поля (ЗСБ) и вертикальных электрических зондирования (ВЭЗ). По результатам интерпретации этих методов получены первые представления о ее глубинном строении [Новые данные ... , 2012]. Местоположение единственной глубокой скважины с забоем на глубине 400 м, впервые пробуренной на территории впадины в 2013 г., было выбрано по данным ЗСБ. Строение впадины осложняет-

ся выходами на дневную поверхность коренных пород фундамента, представленных метаморфическими породами ордовикского возраста [Государственная геологическая ... , 2019]. На участках выходов этих пород были выполнены измерения методом электротомографии по системе профилей в западной и центральной частях Уймонской впадины. Результаты исследований позволили уточнить геоэлектрическое строение верхней части разреза. В итоге интерпретации всего объема данных ЗСБ и ВЭЗ за разные годы были построены глубинные геоэлектрические модели впадины. Оценены мощности и интервалы удельных электрических сопротивлений отдельных литологических комплексов со стратиграфической привязкой, выделены разрывные нарушения. Для впадины получена блоковая модель поверхности фундамента; разломы имеют субмеридиональное простирание в отличие от Чуйской и Курайской депрессий, в которых крупные разломы совпадают с простиранием окаймляющих впадины хребтов. В связи с этим заложение и геологическое развитие Уймонской котловины может отличаться от других подобных структур Горного Алтая. Полученные результаты могут быть интересны специалистам геологических направлений в решении фундаментальных проблем, связанных со строением и геодинамикой впадин Горного Алтая, и имеют практическое значение для поиска месторождений полезных ископаемых.

Работа выполнена в рамках темы НИР FWZZ-2022-0025 ИНГГ СО РАН.

Литература

Новые данные о строении Уймонской впадины (Горный Алтай) / Е. В. Деев, Н. Н. Неведрова, Г. Г. Русанов [и др.] // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2012. Т. 9, № 1. С. 15–23.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Издание второе. Серия Горно-Алтайская. Лист М-45–XIV (Усть-Кокса): объяснит. зап. М.: ВСЕГЕИ, 2019.

ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СОВРЕМЕННОЙ ГЕОДИНАМИКИ МОНГОЛО-СИБИРСКОГО РЕГИОНА ПО ДАННЫМ ГНСС ИЗМЕРЕНИЙ

**В. А. Саньков¹, А. В. Лухнев¹, А. И. Мирошниченко¹,
С. В. Ашурков¹, А. В. Саньков¹, А. А. Добрынина¹,
А. В. Парфеевец¹, Е. Ю. Ефимов²**

¹Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия, sankov@crust.irk.ru

²ООО «ВолксКрупп-АЕ», Санкт-Петербург, Россия

Основоположник сибирской тектонофизической школы профессор С. И. Шерман высоко оценивал значение инструментальных методов изучения структуры и деформаций земной коры в развитии тектонофизических исследований. Так, использование спутниковой геодезии дает возможность оценки движений и деформаций на разных масштабных уровнях, что является хорошим ограничением для тектонофизических моделей. Организованная сеть пунктов Байкало-Монгольского геодинамического ГНСС полигона охватывает все основные активные структуры Южной Сибири и Монголии, ее плотность и расположение пунктов позволяет решать задачи по исследованию различных аспектов современной геодинамики региона, внося вклад в изучение тектонофизических закономерностей развития внутриконтинентальных деформаций по разным направлениям.

Источники и зональность тектонических деформаций. По данным измерений рассчитано поле современных горизонтальных движений и деформаций для территории. Выделены два главных источника современных деформаций вблизи южной границы Северной Евразии – ее конвергенция с Индостаном и дивергенция с Амурской плитой. Установлено зональное распределение преобладающих типов горизонтальных деформаций, связанное с удалением от границ литосферных плит и структурой коры.

Количественная оценка скоростей континентальных деформаций. Определена скорость дивергенции Сибирского и Забайкальского блоков, которая составляет $3,4 \pm 0,7$ мм/год. При этом скорость горизонтальных деформаций достигает $2,1 \cdot 10^{-8}$ в год в Байкальской впадине и постепенно уменьшается в обе стороны поперек рифта. С использованием данных наземных полигонометрических измерений и измерений методом спутниковой геодезии оценены деформации земной поверхности на Северомуйском геодинамическом полигоне в пределах Ангаракан-Муяканского блока за 36-летний период. Скорость относительного горизонтального удлинения составила первые единицы на 10^{-7} в

год в направлении 300–350°. Территории юга Сибирской платформы и Забайкалья характеризуются скоростями горизонтальных деформаций порядка единиц на 10^{-9} в год.

Соотношение современных и позднекайнозойских деформаций. Сопоставления показали, что тип современных деформаций коррелирует с типом напряженного состояния земной коры по сейсмологическим и геолого-структурным данным. Различия связаны с областями плейстоцен-голоценовой перестройки напряженно-деформированного состояния или зонами сильнейших землетрясений недавнего прошлого.

Соотношение современных деформаций и сейсмичности. Для Байкальской впадины показано, что участки повышенной сейсмической активности располагаются в пределах зоны максимума современных деформаций, а скорость реализации сейсмического момента находится в прямой зависимости от скорости деформации. Оценка дефицита реализации сейсмического момента для землетрясений $M \geq 5,0$ за исторический и инструментальный периоды наблюдений по отношению к скорости накопления геодезического момента позволяет рассчитать уровень текущей сейсмической опасности крупных структур. Определенное прогнозное значение имеет установленная закономерность локализации очагов сильных землетрясений последних лет с $M > 5$ в Байкальской рифтовой системе к областям перехода между зонами относительного сжатия и растяжения земной поверхности, что может быть использовано для выявления вероятных зон подготовки очагов сильных землетрясений будущего с целью оптимального размещения сетей наблюдений за их краткосрочными предвестниками.

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В РАЗЛОМНО-БЛОКОВОЙ СТРУКТУРЕ ЛИТОСФЕРЫ АНАТОЛИЙСКОГО РЕГИОНА

В. Б. Свалова

Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН, Москва, Россия
Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН
Владикавказ, Россия, v-svalova@mail.ru

Землетрясение магнитудой 7,8 произошло на юго-востоке Турции 6 февраля 2023 г. Место землетрясения связано с тройным сочленением Анатолийской, Аравийской и Африканской плит и приурочено к Восточно-Анатолийскому разлому, который образует границу между Анатолийской и Аравийской плитами [Active seismotectonics of ... , 2022; Stein, Barka, Dieterich, 1997].

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

Построение геодинамических моделей глубинного строения районов стихийных бедствий является важным вкладом в изучение активных континентальных окраин, что необходимо для предупреждения, предсказания и прогнозирования землетрясений, оценки геозкологических рисков и подготовки действий населения в случае стихийных бедствий и катастроф [Earthquakes – Forecast ... , 2018].

Геодинамическая модель Кавказско-Анатолийского региона определяется мантийным потоком, поднимающимся с поверхности ядра и распространяющимся под литосферой, создавая сложные поверхностные скорости в Анатолии – на запад; в Аравийской плите – на восток; на Кавказе – на север. Этот поток будет продолжать перемещать вещество вдоль Северо-Анатолийского и Восточно-Анатолийского разломов [Ershov, Nikishin, 2004].

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

Так как Восточно-Анатолийский разлом произвел сильные землетрясения в 1789 ($M = 7,2$), 1795 ($M = 7,0$), 1872 ($M = 7,2$), 1874 ($M = 7,1$), 1875 ($M = 6,7$), 1893 ($M = 7,1$), 2020 ($M = 6,8$), 2023 г. ($M = 7,8$, $M = 7,7$), то повторяемость групп (1790 – 1880 – 2020) составляет около 100 лет. Вместе с тем внутри групп бывает 2–4 близких по времени сильных землетрясения. Можно прогнозировать, что сильное землетрясение на Восточно-Анатолийском разломе произойдет если не через 1–2 года, то только через 100 лет.

Литература

Active seismotectonics of the East Anatolian Fault / S. E. Güvercin, H. Karabulut, A. Ö. Konca [et al.] // Geophysical Journal International. 2022. 230 (1). P. 50–69.

Earthquakes – Forecast, Prognosis and Earthquake Resistant Construction / ed. V. Svalova. InTech, 2018. DOI: 10.5772/intechopen.71298

Ershov A. V., Nikishin A. M. Recent geodynamics of the Caucasus-Arabia-East Africa region // *Geotectonics*. 2004. N 2. P. 55–72.

Stein R. S., Barka A. A., Dieterich J. H. Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering // *Geophysical Journal International*. 1997. Vol. 128, Iss. 3. P. 594–604.

РЕКОНСТРУКЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ-ДЕФОРМАЦИЙ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИМАСШТАБНОГО ПОДХОДА ОТ РЕГИОНАЛЬНОГО ДО МИКРОУРОВНЯ НА ПРИМЕРЕ ОБРУЧЕВСКОЙ СИСТЕМЫ РАЗЛОМОВ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

А. Д. Свечеревский, С. А. Устинов

Институт геологии рудных месторождений, петрографии,
минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия
alexey@svecherevskiy.ru

Для реконструкции поля напряжений-деформаций (ПНД) системы разломов Обручевской системы Байкальской рифтовой зоны различных рангов от регионального до микроуровня проведен комплексный анализ с применением ГИС-технологий и данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Исследование включало структурно-геоморфологические, пространственно-геометрические, пространственно-плотностные, микроструктурные и тектонофизические методы. Для решения данной задачи применено авторское программное обеспечение (ПО) Lineament Stress Calculator, интерпретирующее ориентировки выявленных линейных структур на различных масштабных уровнях согласно модели П. Л. Хэнкока [Hancock, 1985].

На начальном этапе исследования создана и визуализирована цифровая модель рельефа с использованием данных ДЗЗ FABDEM. На ее основе проведен линеаментный анализ с выявлением спрямленных элементов рельефа с помощью ПО на основе нейросетевых технологий [Разработка методики ..., 2023]. В результате выделены линеаменты четырех масштабных уровней: регионального, субрегионального, надлокального и локального.

Для субрегионального масштаба выделены зоны динамического влияния основных разрывных структур Обручевской системы разломов – Прибайкальского, Приморского и Академического. Детальный анализ схем линейной плотности позволил выявить зоны предполагаемого влияния структур и провести их сегментацию, реконструировав для каждого сегмента параметры наиболее проявленного ПНД.

Для реконструкции параметров ПНД на микроуровне в районе Приморского разлома Байкальской рифтовой зоны отобрано и проанализировано более 450 ориентированных образцов горных пород, из которых сделаны шлифы и получены их фотографии. Растровые изображения также обрабатывались с помощью обозначенного выше ПО.

На микроуровне установлена наследственность наиболее проявленных микротрещин по отношению к структурам низшего ранга. В ряде случаев наблюдалось соответствие основного тренда микротрещин в образце с ориентировкой структуры (или ее сегмента) низшего ранга, из зоны которой отобран образец. Это определяет глубокую унаследованность структур на всех рассмотренных масштабных уровнях. В узлах пересечения магистрального разлома с оперяющей его структурой высшего ранга в отобранных образцах на микроуровне наблюдался поворот тренда от магистральной к тренду оперяющей структуры.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-77-10087.

Литература

Разработка методики автоматического выделения линейментов на основе нейросетевого подхода / Г. А. Гришков, И. О. Нафигин, С. А. Устинов, В. А. Петров, В. А. Минаев // Исследование Земли из космоса. 2023. № 6. С. 86–97.

Hancock P. L. Brittle Microtectonics: Principles and Practise // Journal of Structural Geology. 1985. Vol. 12, N 7. P. 437–457.

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА К ВЫЯВЛЕНИЮ ЭМАНАЦИОННОГО ОТКЛИКА СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В БАЙКАЛЬСКОМ РЕГИОНЕ

А. К. Семинский, К. Ж. Семинский

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия,
zzzsancheszzz@gmail.com

Исследование взаимосвязи вариаций объемной активности радона (Q , Бк/л) в подземных водах Южного Прибайкалья с сейсмической активностью в пределах Байкальского региона базируется на данных ежедневного опробования подземных вод из источника, находящегося в южной части крупного Ангарского разлома.

За трехлетний период (с 2020 г.) в пределах территории исследования произошло более 1,5 тыс. землетрясений с энергетическими классами от 8,6 до 16 [Байкальский филиал, 2018]. Из общего каталога землетрясений выбрано 15 наиболее значимых сейсмических событий

(с энергетическими классами $K \geq 13,3$), на которых сосредоточено дальнейшее исследование.

Визуальный анализ графика вариаций объемной активности радона с нанесенными на него моментами землетрясений показал, что во всех 15 случаях в пределах нескольких суток до или после в эманационном поле наблюдались отчетливые флуктуации [Семицкий, 2022].

Несмотря на обязательный отклик эманационного поля на все значимые события, параметр Q показывает большое количество всплесков, не связанных с землетрясениями, что обуславливается совокупным влиянием на концентрацию радона как эндо-, так и экзогенных факторов. Таким образом, для разработки методики выявления процессов подготовки землетрясений, необходимо применять комплексный подход к анализу вариаций параметра Q , который будет базироваться не только на визуальном исследовании кривых, но и на статистической обработке данных мониторинга в совокупности с информацией о характеристиках окружающей среды.

В качестве одного из подходов к статистической обработке данных мониторинга предлагается исследование корреляционных связей между параметром Q и среднесуточным атмосферным давлением (P). Парная корреляция (R) для параметров Q и P рассчитана в скользящем окне (30 сут). В качестве дополняющих данных рассчитана информационная энтропия S_Q и S_P .

За аномалии рядов значений R и R_S приняты отрезки времени с колебаниями, превышающими два стандартных отклонения (σ). За трехлетний период в рядах R и R_S выявлено 21 и 16 таких аномалий соответственно. Важно отметить, что большинство из них по времени совпадает с моментами сейсмических событий, из числа наиболее значимых. Так, в пределах месяца до или после рассматриваемых землетрясений каждый график характеризуется наличием одной, реже – двух аномалий.

Проведенное исследование позволяет сделать вывод о том, что подготовка наиболее значимых сейсмических событий на исследуемой территории может быть зафиксирована при анализе вариаций объемной активности радона в подземных водах как визуальным, так и статистическими способами, а для исключения ложных аномалий необходимо комплексирование методов их выделения. Полученные результаты свидетельствуют об определенных перспективах разработки для Байкальского региона формализованной методики выявления эманационных предвестников наиболее сильных землетрясений.

Литература

Байкальский филиал геофизической службы. 2018. URL: <http://seis-bykl.ru/> (дата обращения: 10.02.2024).

Семинский А. К. Вариации радона в подземных водах при подготовке и реализации сейсмических событий Байкальского региона // Геодинамика и тектонофизика. 2022. № 13 (2s). <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0631>

ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ И РАЗЛОМНАЯ ТЕКТНИКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА

Л. А. Сим

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия
lidasim466@gmail.ru

Изучение разломной тектоники, тектонических напряжений на месторождениях углеводородного сырья проведено нами с соавторами в пределах Иркинеево-Чадобецкого рифтогенного прогиба (ИЧРП) на Сибирской платформе, на севере Западно-Европейской плиты и месторождении Большой Салым в ее центральной части, на п-ове Мангышлак и в других регионах, новейшая разломная тектоника которых была изучена на основе дешифрирования разномасштабных топографических карт и космических снимков с последующим сопоставлением с материалами предшественников. Структурно-геоморфологическим методом (СГ) [Сим, 2000] в зонах разломов восстанавливались неотектонические напряжения. Для большинства исследованных месторождений углеводородов восстановлены сдвиговые неотектонические напряжения с преобладанием субмеридиональной ориентацией оси сжатия и субширотной – растяжения. Как на отдельных месторождениях газа Иркинеево-Чадобецкого рифтогенного прогиба, так и на ряде других месторождений углеводородов на Сибирской платформе установлено, что секторы растяжения, образующиеся на пересечении разнонаправленных сдвигов, характеризуются высокими дебитами газа (Абаканское, Ильбокичское – ИЧРП). Беряmbинское месторождение в пределах ИЧРП расположено в области распространения разрывных нарушений, которые формируются в обстановке сжатия, что, по-видимому, является причиной низкой продуктивности основной части скважин [Влияние новейшей геодинамики ... , 2016]. На основании тектонофизических исследований в указанном прогибе было прогнозировано 8 участков, перспективных по тектонофизическим критериям на наличие скоплений газа. В центральной части Западно-Сибирской плиты на месторождении Большой Салым было установлено, что наиболее

продуктивная скважина пробурена в секторе растяжения, сформированного на пересечении разнонаправленных сдвигов и вблизи разлома, формирующегося в обстановке растяжения [Влияние неотектонических ... , 2002]. Закономерная приуроченность скважин с высоким содержанием углеводородов была отмечена и на месторождениях Мангышлака [Сим, Сабиров, Гордеев, 2019].

Литература

Влияние неотектонических напряжений на распределение нефтегазоносности платформенных территорий / Л. А. Сим, А. Я. Фурсов, Е. В. Постников [и др.] // Тектонофизика сегодня. М. : ОИФЗ РАН, 2002. С. 244–247.

Влияние новейшей геодинамики на газоносность Иркинеево-Чадобецкого рифтогенно-го прогиба / Л. А. Сим, А. В. Постников, О. В. Постникова, В. В. Пошибаев // Экспозиция. Нефть. Газ. 2016. № 6 (52).

Сим Л. А., Сабиров И. А., Гордеев Н. А. Новейшее напряженное состояние Мангышлака и возможное его влияние на распределение месторождений углеводородов // Экспозиция. Нефть. Газ. 2019. № 4 (71). С. 22–26.

Сим Л. А. Влияние глобального тектогенеза на новейшее напряженное состояние платформ Восточной Европы // М. В. Гзовский и развитие тектонофизики. М. : Наука, 2000. С. 326–348.

О РЕГИОНАЛЬНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ СЕЙСМИЧНОСТИ В КУЗБАССЕ

А. Н. Соловицкий

Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия
san.mdig@mail.ru

Для существующего подхода к изучению сейсмичности в Кузбассе, нацеленного на доминирование техногенной сейсмичности над природной, характерно отсутствие ее затухания и продолжительных рядов инструментальных наблюдений геодинамики земной коры [Адушкин, 2018]. Традиционным моделям на основе сетей сейсмологических станций сложно найти приемлемое решение [Solovitskiy, 2024]. При этом сложность процесса требует развития комплексного подхода к его изучению. Однако, несмотря на материальные и людские потери, изучение региональных закономерностей сейсмичности региона до настоящего времени все еще находится в начальной стадии. В связи с этим, по мнению автора, в Кузбассе необходимо развивать комплексный и многоуровневый мониторинг природных и техногенных геодинамических и сейсмических процессов, что возможно обеспечить при современном уровне развития науки, техники и технологий. Ключевым направлением формирования указанного подхода является

его нацеленность на изучение региональных закономерностей сейсмичности путем создания продолжительных рядов комплексных инструментальных наблюдений. В условиях сложившейся ситуации в Кузбассе, характеризующейся существованием передовых технологических возможностей в геофизике и геодезии и недостаточностью полноценных теоретических разработок и моделей в области получения, сбора, регистрации, обработки и анализа информации об изменении состояния земной коры и формировании очагов сейсмических событий, требуется разработка методики реализации комплексных и продолжительных инструментальных наблюдений для изучения региональных закономерностей сейсмичности региона. Автором предложен переход к фундаментальным исследованиям на основе многолетних инструментальных наблюдений для установления взаимосвязи сейсмической и геодинамической активности путем контроля изменения во времени плотности потенциальной энергии. Фундаментальные исследования на основе проведения многолетних комплексных инструментальных наблюдений с учетом строения и иерархии земной коры характеризует интеграция взаимодействия между смежными науками о Земле (сейсмологией, геофизикой, геодезией, геодинамикой и геомеханикой). Практическое использование результатов исследований заключается в расширении использования геодезических и геофизических методов для изучения региональных закономерностей сейсмичности региона. Теоретическое обоснование предложенной методики выполнено на основе моделирования изменения состояния блока земной коры, что обеспечивает связь его геодинамической и сейсмической активности и является решением научной задачи, имеющей важное социально-экономическое значение в области геодинамической и сейсмической безопасности при освоении недр.

Следовательно, тема исследований актуальна и имеет научный и практический интерес.

Литература

Адушкин В. В. Развитие техногенно-тектонической сейсмичности в Кузбассе // Геология и геофизика. 2018. Т. 59, № 5. С. 709–724.

Solovitskiy A. N. On the foundations of seismic safety of the Kuznetsk Basin // ICAPE 2024 E3S Web of Conferences. 2024. 498, 03002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202449803002>

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОН НЕОБРАТИМОЙ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗЛОМООБРАЗОВАНИЯ В ЗЕМНОЙ КОРЕ

Ю. П. Стефанов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики
им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия, yu_st@mail.ru
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
Томск, Россия

Развитие необратимой деформации, формирование разломов и нарушений разного масштаба определяется действующей нагрузкой и особенностями строения, свойствами горных пород. Неоднородное строение горных пород и массивов, наличие пор и трещин разного масштаба приводят к их нелинейному поведению под нагрузкой. От напряженного состояния зависят их упругие и прочностные свойства. Необратимая деформация горных пород может сопровождаться разрыхлением или уплотнением, соответственно зоны локализации и формирующиеся разломы могут иметь разную ориентацию. Кроме того, при рассмотрении процессов необратимой деформации и разломообразования в земной коре необходимо учитывать наличие флюида.

В докладе рассмотрено влияние соотношения прочностных свойств и условий деформирования на зарождение и развитие полос локализованного сдвига. Рассмотрен ряд примеров моделирования процессов деформации в геологической среде. Показано, что конфигурация разломной зоны в верхних слоях земной коры в значительной мере зависит как от свойств пород, в первую очередь, внутреннего трения и порового давления, так и от соотношений между главными компонентами напряжений. От этих факторов зависит также расположение очагов зарождения необратимой деформации и направление развития зон локализации деформации. В определенных случаях первичные структуры нарушений формируются на поверхности и развиваются вглубь на ограниченную глубину, в то время как основные разломы могут развиваться снизу и иметь большую амплитуду смещений. Показан пример простой оценки условий формирования возможных очагов развития необратимой деформации и полос локализованного сдвига.

ВОЛНООБРАЗНЫЙ ХАРАКТЕР ДЕФОРМАЦИЙ ВДОЛЬ СДВИГОВЫХ СЕЙСМОГЕННЫХ РАЗРЫВОВ – ПРОЯВЛЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЦЕССА РАЗРЫВООБРАЗОВАНИЯ

А. Л. Стром

НИИЭС – филиал АО «Институт Гидропроект», Москва, Россия,
strom.alexandr@yandex.ru

Анализ описаний детально изученных сейсмогенных разрывов, образовавшихся при 67 землетрясениях, произошедших в разных районах мира, 38 из которых имели преобладающую сдвиговую компоненту подвижки, показал существенную изменчивость величины одновременного смещения вдоль простирания разрывов [Стром, Никонов, 1999]. Если на изменчивость вертикальной компоненты могут влиять такие факторы, как положение разрыва в рельефе, наличие или отсутствие и мощность рыхлого чехла на участке измерений, то горизонтальная компонента в большей мере отражает именно особенности тектонических деформаций. При некоторых землетрясениях число точек, для которых в публикациях приведены значения подвижки, составляло несколько десятков, иногда более 100, а среднее расстояние между точками измерений не превышало первых сотен (иногда даже нескольких десятков) метров.

Что означает такая неравномерность амплитуды смещения при сдвиговых подвижках? Представим, что сдвиговой разрыв сместил несколько линейных объектов (заборов, дорог и т. п.) и при этом величина, на которую смещены эти объекты, разная. Будем считать, что одно крыло разрыва неподвижно, а двигалось второе крыло. Если репер № 1 смещен на величину A , следующий (№ 2), расположенный по направлению подвижки по разрыву, на величину $A+X$, а репер № 3 – опять на величину A , то это означает, что условный блок, расположенный между реперами 1 и 2, растянулся на величину X , а соседний условный блок, расположенный между реперами 2 и 3, наоборот, сжался на такую же величину. Блоки названы условными, так как расположение реперов, по которым измерялись смещения, не имеет отношения к тектоническим структурам, и мы не знаем, были эти деформации распределены равномерно по блоку или были сосредоточены в какой-то его части. При этом такие деформации распределялись волнообразно, т. е. растяжение сменялось сжатием, так что активное крыло разрыва представляет собой как бы застывшую продольную волну.

Сложность количественной оценки таких деформаций обусловлена тем, что в подавляющем большинстве случаев объекты, по которым измерялись смещения, распределены неравномерно, поэтому существенно меняются как расстояния между точками измерений у разрывов разных землетрясений, так и вдоль каждого из изученных разрывов. Обычно точки измерений сгущаются на участках со значительными для данного разрыва амплитудами смещений. Расстояния между точками измерения, приведенные в публикациях, также сильно зависят от протяженности разрыва – чем длиннее разрыв, тем больше расстояние между ними. Аналогичные различия величины подвижки вдоль направления смещения по разрыву, по-видимому, характерны и для разрывов с преимущественно вертикальными смещениями. По крайней мере, в единичных случаях, когда сейсмогенный разрыв был измерен и на поверхности, и на глубине, в тоннелях, величины смещений различались.

Следует отметить, что такое волнообразное распределение сдвиговых деформаций наблюдалось и в экспериментах на моделях, проводившихся в ИЗК СО РАН [Борняков, Пантелеев, Тарасова, 2016]. Можно предположить, что описанное явление отражает некую фундаментальную особенность разрывообразования, в том числе сейсмогенного.

Литература

Борняков С. А., Пантелеев И. А., Тарасова А. А. Дискретно-волновая динамика деформаций в сдвиговой зоне: результаты физического моделирования // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7, вып. 2. С. 289–302.

Стром А. Л., Никонов А. А. Распределение смещений вдоль сейсмогенных разрывов и учет неравномерности подвижек при палеосейсмологических исследованиях // Вулканология и сейсмология. 1999. № 6. С. 47–59.

ПРОСТРАНСТВЕННО НЕОДНОРОДНАЯ СТРУКТУРА ОБЛАСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АФТЕРШОКОВ КУЛТУКСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 2008 ГОДА С $M_w = 6,3$ НА БАЙКАЛЕ

В. Д. Суворов¹, Ц. А. Тубанов², Н. А. Гилева³

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
Новосибирск, Россия, SuvorovVD@ipgg.sbras.ru

²Геологический институт им. Н. Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия

³Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН, Иркутск, Россия

Обнаружено пространственно упорядоченное распределение гипоцентров афтершоков Култукского землетрясения по глубине и скорости продольных волн. Для этого использован метод квадратичных координат в модели отраженных волн [Гольдин, Суворов, 1977]. Последовательными приближениями для данных, полученных сейсмологическими станциями, расположенными в юго-западной части оз. Байкал [Предварительные результаты ... , 2008; Култукское землетрясение ... , 2012], обнаружена упорядоченность в распределениях изменений значений эффективной скорости в зависимости от глубины афтершоков для пяти групп событий, определяемых количеством уверенно коррелирующихся данных. Величина коэффициента линейной корреляции между квадратами эпицентральных расстояний и временами пробега в зависимости от количества выбранных событий с минимальным разбросом изменяется в интервале 0,96–0,99. Пониженное значение корреляции характерно для годографов с укороченной длиной и малым количеством событий. При этом в использованном объеме данных из 458 значений 409 (75 %) характеризуются упорядоченной корреляцией, а оставшиеся 140 (25 %) – случайным разбросом. Эффективная скорость по формуле Дикса пересчитывалась в значения, соответствующие мощностям локальных неоднородностей и глубине их залегания.

В среднем центральная часть афтершоковой области характеризуется на глубине 5,0–12 км скоростью 5,2–5,6 км/с при локальных вариациях. По данным наиболее удаленных от эпицентров станций, скорость повышена до 5,9–6,4 км/с, увеличиваясь в среднем до максимальных значений на глубине 15–19 км.

Результат представляется в виде блоковой модели при скачкообразных изменениях скорости по латерали и глубине афтершоков. Область с относительно пониженной скоростью, прослеженная до глубины около 9 км, смещена в северо-западном направлении от места Култукского землетрясения.

Литература

Гольдин С. В., Суворов В. Д. Методы квадратичных координат в задаче интерпретации годографов отраженных волн // Геология и геофизика. 1977. № 9. С. 114–125.

Култукское землетрясение 2008 г. с $M_w = 6,3$ на юге Байкала: Пространственно-временной анализ сейсмической активизации / В. И. Мельникова, Н. А. Гилева, В. В. Быкова, О. К. Масальский // Физика Земли. 2012. № 7–8. С. 42–62.

Предварительные результаты эпицентральных наблюдений Култукского землетрясения 27 августа 2008 г. / С. С. Арефьев, В. В. Быкова, Н. А. Гилева [и др.] // Вопросы инженерной сейсмологии. 2008. Т. 35, № 4. С. 5–15.

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ УПРУГОПЛАСТИЧНОГО ПРЯМОУГОЛЬНОГО МАССИВА ПРИ СЖАТИИ

А. А. Татаурова¹, Ю. П. Стефанов^{1,2}

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
Новосибирск, Россия, anttat2@gmail.com

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

При изучении тектонических процессов, которые приводят к образованию надвиговых структур, в настоящее время помимо натуральных наблюдений широко применяются методы численного моделирования. В докладе рассмотрена задача о напряженно-деформированном состоянии и образовании зон локализованного сдвига в прямоугольном массиве, лежащем на жестком основании, в обстановке горизонтального сжатия. Были исследованы процессы формирования и развития зон локализации деформации в зависимости от свойств среды и трения в основании. Рассмотрены варианты однородной и слоистой моделей. Основное внимание уделено особенностям образования и развития полос локализованного сдвига.

Задача решалась в двумерной постановке в рамках упругопластической модели поведения среды. Деформация за пределом упругости описывалась при помощи варианта модифицированной модели Друкера – Прагера с учетом упрочнения и разупрочнения.

Представленные решения описывают лишь начальную стадию процесса образования надвигов, на которой формируются полосы локализованного сдвига, вдоль которых возникают смещения среды. Подвижки приводят к изменению формы дневной поверхности: прямоугольный слой утолщается, образуя поднятия, достигающие наибольших значений со стороны приложения боковой нагрузки.

Обычно считается, что при образовании надвигов их падение должно быть направлено в сторону приложения боковой нагрузки. Однако результаты натуральных наблюдений и физического моделирования свидетельствуют о возможности развития второстепенных разломов с обратным падением. В некоторых случаях они могут быть главными. Этот результат также подтверждается численным моделированием.

Полученные результаты показали, что при больших значениях коэффициента внутреннего трения (больше 0,6) зоны локализации могут зарождаться вблизи дневной поверхности. В этом случае полосы локализованного сдвига не всегда пронизывают всю толщу и достигают основания, а направление развития часто бывает обратным. Такие полосы локализации можно интерпретировать как трещины или зоны ослабления горных пород, так как смещения в них остаются ограниченными по величине, а увеличение смещения боковой границы не приводит к ярко выраженному изменению рельефа. При значениях внутреннего трения менее 0,6 влияние трения в основании на напряженно-деформированное состояние среды становится более существенным. Полосы локализованного сдвига развиваются от основания толщи к поверхности. В этом случае возникает значительное изменение рельефа.

Учет слоистости значительно усложняет картину деформирования, приближая ее к более реальным геологическим условиям. Пластичные и вязкие слои могут тормозить развитие полос локализованного сдвига или пропускать их частично. Кроме того, возможно их относительное смещение. Это приводит к ярусной картине деформирования. На развитие деформации и образование сети полос локализованного сдвига в каждом из слоев большое влияние оказывают не только их индивидуальные свойства, но контраст распределения свойств по слоям.

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ FWZZ-2022–0021 «Региональные особенности структуры земной коры и верхов мантии платформенных и складчатых областей Сибири, их напряженно-деформированное состояние по данным сейсмологии, гравиметрии и геомеханики».

ПРОЯВЛЕНИЕ НА ПОЗДНЕАЛЬПИЙСКОМ ЭТАПЕ КИНЕМАТОГЕННЫХ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ В РАЗНОВОЗРАСТНЫХ ОРОГЕНАХ ЕВРАЗИИ

Т. Ю. Тверитинова

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Москва, Россия, tvertat@yandex.ru
Институт физики Земли, Москва, Россия

В структуре Евразии присутствуют разновозрастные орогены различных простираций с преобладанием диагональных относительно меридионально-широтной сети. На позднеальпийском этапе развития главным на большей части территории Евразии является поле напряжений меридионального сжатия, которое мы объясняем полярным сжатием вращающейся планеты. Помимо меридионального сжатия в различно ориентированных складчатых системах отражено влияние полей напряжений, характеризующихся продольной и поперечной к их простирацию ориентировками оси максимального сжатия. Эти поля мы вслед за Л. М. Расцветаевым [1987] называем кинематогенными.

Проявление дополнительных кинематогенных полей напряжений связано с тем, что в условиях Главного поля напряжений при преимущественно диагональных простирациях орогенов вдоль орогенов СЗ простираения происходит правосдвиговая деформация, вызывающая действие СЗ горизонтального сжатия (леводиагональное кинематогенное поле напряжений), а вдоль орогенов СВ простираения – левосдвиговая деформация, с которой связано проявление СВ горизонтального сжатия (праводиагональное кинематогенное поле напряжений). Кинематогенные поля напряжений приводят к формированию в структуре орогенов субпродольных им отрывов, поперечных структур сжатия и диагональных правых и левых сдвигов. Если сжатие ориентировано к орогену примерно под углом 45° и наиболее выраженной деформацией вдоль орогена является сдвиговая, то продольные отрывы и поперечные структуры сжатия равноправны. При меньших углах характерно предпочтительное развитие дополнительных субпараллельных орогену структур растяжения, указывающих на условия поперечного орогену растяжения. При углах больше 45° предпочтительнее формируются дополнительные субпараллельные орогену структуры сжатия, отражающие условия сжатия, ориентированного к орогену поперечно.

Указанные соотношения распределения структур и полей напряжений фиксируются на ориентированных в СЗ направлении орогенах Большого Кавказа, Горного Алтая и Восточного Саяна. Во всех ороге-

нах проявлено леводиагональное поле СЗ сжатия, связанное с реализацией вдоль них правосдвиговой деформации, обусловленной Главным полем меридионального сжатия. Вместе с тем на Большом Кавказе наиболее выразительно проявляется поперечное орогену сжатие, в Горном Алтае – продольное, в Восточном Саяне одинаково проявлены оба кинематогенных поля напряжений.

Сочетание на позднеальпийском этапе развития главного и кинематогенных полей напряжений определяют сложную тектодинамическую обстановку формирования современной структуры орогенов, в которой сохраняются и усиливаются элементы их уже сформированной прежде структуры, а также формируются новообразованные структурные элементы.

Литература

Расцветаев Л. М. Парагенетический метод структурного анализа дизъюнктивных тектонических нарушений // Проблемы структурной геологии и физики тектонических процессов. М. : ГИН АН СССР, 1987. С. 173–235.

СТРУКТУРНЫЕ ГРАНИЦЫ И СОВРЕМЕННЫЕ СМЕЩЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ

**В. Ю. Тимофеев¹, Д. Г. Ардюков¹,
М. Г. Валитов², А. В. Тимофеев¹**

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
Новосибирск, Россия, timofeevvy@ipgg.sbras.ru

²Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН,
Владивосток, Россия

Измерения современных смещений и деформаций в зоне межплитных и внутриплитных границ позволяют определить возможности геофизических методов для изучения зон разломов. Многолетние исследования выполнены на сейсмостанции Талая, которая находится в нескольких километрах южнее Главного Саянского разлома (ГСР), играющего важную роль в геодинамике области сочленения Сибирской платформы со структурами Байкальской рифтовой зоны. Для наблюдений на станции в период с 1985 по 2015 г. применялся специальный инструмент: деформографы и наклонометры, относительные и абсолютные гравиметры, датчики уровня, способные регистрировать временные вариации деформации с амплитудой 10^{-9} и точнее. Наблюдения 3D смещений выполняются методом космической геодезии с весны 2000 г. В результатах измерений деформаций выделяются приливные

вариации с амплитудой $3 \cdot 10^{-8}$, сезонные и многолетние периодические с амплитудой до 10^{-6} . Приливный анализ наклонов и деформаций показал фазовый сдвиг приливной волны M2 на 9° относительно приливной силы, который связан с существованием внутрикоровой границы в виде ГСР. Близкое Култукское землетрясение 27.08.2008 ($M = 6,5$) вызвало сдвиг фазы на $1-2^\circ$. Данные о затухании наклона за 25 лет позволили получить постоянную времени релаксации и в рамках вязкоупругой модели Кельвина – Фойхта оценить величину эффективной вязкости ($\eta = 1,0 \cdot 10^{19}$ Па·с). Из анализа многолетнего хода наклона получена величина переменной части тектонического напряжения $\sigma_{zx} = 5$ бар (0,5 МПа), которую, как и значение вязкости, возможно, следует отнести к зоне ГСР. Исследование вариаций поля силы тяжести, наклонов, деформаций и уровня воды в скважине приводит к выводу о локальном характере регистрируемых в штольне деформаций, вызванных термическими влияниями на резкопересеченном рельефе. Такие деформации охватывают территорию до нескольких километров, включая ГСР. Горизонтальное относительное смещение станции Талая, по данным GPS, составило 1,7 мм/год на ЮВВ при вертикальном опускании 1–3 мм/год.

Проанализированы возможности метода космической геодезии при исследовании восточной окраины Евразии. Относительные скорости на границах Евразийской и Северо-Американской тектонических плит меняются от 2–4 мм/год на севере в районе Тикси – Магадан, до 10–15 мм/год в районе Приморье – Сахалин. Меньшие по протяженности внутриконтинентальные структурные границы должны иметь и меньшие относительные скорости. В Приморье один из значимых структурных элементов – это Центральный Сихотэ-Алиньский разлом (ЦСАР). По данным GPS, вектор скорости смещения восточного фланга ЦСАР относительно западного составил $1,4 \pm 1,0$ мм/год на ССВ. Можно отметить, что знак смещения соответствует геологическим представлениям. Большая ошибка определения и малая экспериментальная величина скорости, видимо, дают лишь качественную оценку эффекта левостороннего сдвига на разломе, и относительная скорость здесь не превышает 1 мм/год. Для более точных определений необходим продолжительный период измерений с тщательным исключением влияния косейсмических и постсейсмических эффектов землетрясений в субдукционной зоне на границе Тихоокеанской и Евразийской плит.

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЙСМИЧНОСТИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ БАЙКАЛЬСКОГО РИФТА. ОБЗОР ПРОБЛЕМ И НОВЫХ ПОДХОДОВ

Ц. А. Тубанов^{1,2}, А. Н. Беседина³,
С. Б. Кишкина³, Н. А. Радзиминович⁴

¹Геологический институт им. Н. Л. Добрецова СО РАН
Улан-Удэ, Россия, geos@ginst.ru

²Бурятский филиал ФИЦ ЕГС РАН, Улан-Удэ, Россия

³Институт динамики геосфер им. М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

⁴Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

В настоящее время накоплены представительные данные, свидетельствующие о высокой степени структурированности сейсмоактивной среды. При этом природа структуры сейсмичности до сих пор окончательно неясна. Известные подходы к ее объяснению отражают как сложность проблемы, так и явный недостаток знаний о закономерностях формирования разломов и детальных эмпирических данных.

Имеющиеся схемы разломно-блоковой структуры Байкальского рифта построены с учетом сейсмологического данных региональной сети сейсмостанций, где точность определения координат является низкой для детальных построений. Ведущееся уплотнение сети сейсмостанций в центральной части Байкальского рифта, обусловленное проблемой прогноза землетрясений на Южно-Байкальском геодинамическом полигоне [Гольдин, Дядьков, Дашевский, 2001], позволяет увеличить представительность (в сторону меньших энергетических классов) и точность координат очагов землетрясений, и совместить сейсмический мониторинг в пассивном (регистрация землетрясений) и активном (зондирование с управляемым вибрационным источником сейсмических волн) вариантах [Результаты и перспективы ... , 2021]. Современная сеть геофизического мониторинга в центральной части рифтовой зоны [Комплексный мониторинг ... , 2022] и огромный багаж многолетних исследований иркутской школы тектонофизики и сейсмологии позволяет вплотную подойти к разработке модели, учитывающей условия деформирования блоково-разломной среды, влияние флюидов, нелинейность сейсмических процессов и другие факторы [Кочарян, 2021]. Сейсмические данные с повышенной точностью локализации очагов землетрясений позволяют получить информацию о структуре и динамике разломных зон. Это могут быть результаты исследований зон повторных землетрясений, областей афтершоковой и роевой кластеризаций [3D fault architecture ... , 2020, Кочарян, Остапчук, 2022].

Высокая сейсмическая активность, наличие аномалий теплового потока, возникновение грязевулканических структур в акватории оз. Байкал представляют значительный интерес с точки зрения экспериментального исследования характера флюидной реактивации и взаимодействия разломных структур с учетом широкого спектра процессов, сопутствующих разломообразованию.

Литература

Гольдин С. В., Дядьков П. Г., Дашевский Ю. А. Стратегия прогноза землетрясений на Южно-Байкальском геодинамическом полигоне // Геология и геофизика. 2001. Т. 42, № 10. С. 1484–1496.

Комплексный мониторинг опасных геологических процессов в Прибайкалье: организация пилотной сети и первые результаты / К. Ж. Семинский, А. А. Добрынина, С. А. Борняков [и др.] // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13, № 5. С. 2–25.

Кочарян Г. Г., Остапчук А. А. Мезоструктура зоны скольжения тектонического разлома // Физическая мезомеханика. 2022. Т. 25, № 5. С. 94–105.

Кочарян Г. Г. Возникновение и развитие процессов скольжения в зонах континентальных разломов под действием природных и техногенных факторов. Обзор современного состояния вопроса // Физика Земли. 2021. № 4. С. 3–41.

Результаты и перспективы сейсмологических наблюдений в центральной части Байкальского рифта / Ц. А. Тубанов, П. А. Предени, Л. Р. Цыдыпова [и др.] // Российский сейсмологический журнал. 2021. Т. 3, № 4. С. 38–57.

3D fault architecture controls the dynamism of earthquake swarms / Z. E. Ross, E. S. Cochran, D. T. Trugman [et al.] // Science. 2020. Vol. 368, N 6497. P. 1357–1361.

ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗУЧЕНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГИДРОГЕННОГО ТИПА В СВЕТЕ СОВРЕМЕННОЙ ГЕОДИНАМИКИ (НА ПРИМЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНО-КЫЗЫЛКУМСКОЙ УРАНОВОРУДНОЙ ПРОВИНЦИИ УЗБЕКИСТАНА)

Р. А. Турсунметов, В. С. Тё, Х. Ф. Хасанбаев, О. Ш. Урунбаев

ГУ «Институт ГИДРОИНГЕО», Ташкент, Узбекистан,
tursunmetov45@mail.ru

Центральная урановорудная провинция находится у краевых частей артезианских бассейнов, которые граничат с горными массивами, содержащими магматические породы – источники гидрогенного уранового оруденения. В ходе выщелачивания магматических пород уран и сопутствующие компоненты мигрируют в водных потоках к краевым частям бассейнов, где происходит их осаждение. Это контролируется геотектоническими явлениями. Как следствие, указанные процессы, связанные со структурообразованием, можно рассматривать в рамках

парагенеза структурных форм. Совокупность геологических структур, отличающихся целостностью, завершенностью физико-химических процессов и определенным геологическим содержанием, играет ключевую роль в формировании урановых месторождений. В артезианских бассейнах разрезы породного массива можно изучать с учетом иерархии тектонических структур палеозойского, альпийского и неотектонического возраста в рамках эволюции земной коры. Тектонические структуры находятся во взаимосвязи, взаимодействии и взаимообусловленности. Фундаментом артезианских бассейнов служит грабенообразная структура, представленная палеозойскими отложениями, которые в тектонофизическом отношении формировались в условиях горизонтального растяжения. При этом фундамент во многих случаях имеет ступенчатый характер, вызванный развитием тектонических движений сбросового характера. На границе сбросов развиваются касательные напряжения. Палеозойский фундамент характеризуется строением, где чередуются блоки, находящиеся в условиях растяжения и сжатия. Дальнейшее блокообразование связано с развитием альпийских неотектонических структур. Развитие альпийских структур обусловило образование проницаемых отложений, которые послужили в качестве рудовмещающей среды (ураносодержащая среда) в меловых и палеогеновых отложениях.

Далее рассмотрим поведение новейших структур, которые не только контролируют образование кайнозойских отложений, но и оказывают влияние на формирование уранового оруденения. В неотектоническое время имела место тектономагматическая активизация, обуславливающая процесс выщелачивания в магматических телах. Последнее происходило благодаря интенсивному воздействию неотектонических движений, охватывающих палеозойский фундамент. В этом случае в альпийских структурах образовалась рудовмещающая среда адвективного характера, где происходит инверсия физических свойств горных пород. Развитие горизонтальной деформации в краевой части артезианского бассейна обуславливает уплотнение магматических тел, что усиливает процесс выщелачивания. В неотектонический период происходило сжатие структур в меридиональном направлении, что привело в тектонофизическом отношении к горизонтальному сдвигу в горизонтальной плоскости. Это обусловило развитие нарушений в межблоковом пространстве, что благоприятствовало движению водных потоков и в то же время – миграции урана и сопутствующих элементов.

РАЗЛОМНО-БЛОКОВЫЕ ДЕФОРМАЦИИ И ПОЛЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ЮГО-ЗАПАДНЫХ ОТРОГОВ ГИССАРА

Р. А. Умурзаков

Ташкентский государственный технический университет
им. И. Каримова, Ташкент, Узбекистан, umrah@mail.ru

Юго-западные отроги Гиссара (ЮЗГ), являясь составной частью системы горных сооружений Южного Тянь-Шаня, имеют своеобразное строение. Именно здесь наиболее контрастно проявляются различные генетические типы тектонических движений и деформаций, происходящих, с одной стороны, под влиянием направленных сжимающих усилий со стороны Памира – Гиндукуша [Буртман, Гурарий, 1973], с другой стороны, под влиянием глубинных термодинамических процессов, сопровождающихся фазовыми превращениями [Происхождение глобальных ... , 2019], с возникновением упруго-пластических деформаций, перетеканий и внедрений вещества. Здесь наиболее отчетливо проявляется наложение двух систем структурных элементов – северо-западной и северо-восточной. Первая проявляется активизацией вдоль древних докембрийских структур, вторая свойственна альпийскому времени. Общая структура этого региона куда сложнее и также складывается из множества других составляющих элементов. Представленный доклад включает результаты как региональных исследований описываемой территории, так и более детальных наблюдений в пределах отдельных структурных элементов (Байсунтау и др.). Выполнен анализ разломно-блоковой структуры, ее составных элементов – отдельных региональных разломов, разрывных нарушений в пределах отдельных поднятий, крупных трещин, секущих обнажение (массив) горных пород, трещиноватости в пределах обнажений. Вместе с этим проводилось геолого-геоморфологическое картирование элементов пликативных деформаций горных пород с выявлением известных морфологических признаков смещений, характера геологических разрезов, деформаций горных пород, денудационных поверхностей выравнивания, а также других элементов тектоники.

Реконструкция полей напряжений осуществлена на основе использования метода кинематического анализа структур разрушения О. И. Гущенко, методики статистического анализа массовых замеров трещин П. Н. Николаева, основанной на использовании асимметрии в разбросах сколовых трещин.

В пределах западной части Гиссарского хребта и Юго-Западных отрогов Гиссара региональное поле напряжений (условно первого ранга) характеризуется взбросо-сдвиговым типом [Умурзаков, 2010]. Ось растяжения ориентирована на юго-запад (северо-восток). Ось сжатия имеет юго-восточную (северо-западную) ориентировку. Промежуточная ось субвертикальна (угол 70–75°). Сколовые плоскости, образуемые в этом поле напряжений, чаще имеют широтное и северо-восточное простирание с падением первых в южных, и вторых в восточных румбах. Основной вклад в формирование разломов, контролирующих отдельные поднятия ЮЗГ, связан с полем напряжений второго ранга, которое характеризуется субгоризонтальной северо-западной ориентировкой оси сжатия, юго-западной ориентировкой оси растяжения, при близвертикальной промежуточной оси.

Литература

Буртман В. С., Гурари Г. З. О природе складчатых дуг Памира и Тянь-Шаня // Геотектоника. 1973. № 2. С. 62–67.

Происхождение глобальных глубинных разломов и их значение в дегазации Земли / А. Т. Ахвердиев, Н. Т. Керимова, Н. Т. Нариманов [и др.] // Булатовские чтения : сб. ст. Краснодар : Издат. Дом – Юг, 2019. С. 24–30.

Умурзаков Р. А. Отражение элементов современных и новейших полей напряжений в структуре и сейсмогенных проявлениях отдельных эпицентральных областей Западного Тянь-Шаня // Физика Земли. 2010. № 5. С. 15–23. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13856945>

ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИНТЕРПРЕТАЦИИ ЛИНЕАМЕНТОВ ДЛЯ ПРОГНОЗА РУДООБРАЗУЮЩИХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ ТУЮКАНСКОГО УРАНОВОРУДНОГО УЗЛА (МАМСКО-ЧУЙСКИЙ РАЙОН, ИРКУТСКАЯ ОБЛАСТЬ)

**С. А. Устинов, А. Д. Свечеревский, А. М. Чепчугов,
И. А. Кочкин, В. А. Петров**

Институт геологии рудных месторождений, петрографии,
минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия, ustinov@igem.ru

Район Туюканского рудного узла определен в качестве перспективного на урановые, железо- и золоторудные объекты. На основе геоинформационных технологий и обработки данных дистанционного зондирования Земли проведен комплексный анализ, включающий структурно-геоморфологические (линеamentный анализ), пространственно-геометрические, пространственно-плотностные и тектонофизические методы для выявления специфических особенностей развития

каркаса разрывных нарушений, определяющих размещение рудных объектов в пределах территории.

Линеаментный анализ проводился с применением методики, основанной на построении и обработке цифровой модели рельефа. Линеаменты выявлялись с помощью программного обеспечения, разработанного на основе нейросетевых технологий [Разработка методики ... , 2023].

Для реконструкции параметров регионального поля напряжений-деформаций (ПНД) и кинематики основных разломов на основе интерпретации выделенных линеаментов использована модель формирования парагенезиса трещин в зоне сдвига П. Л. Хэнкока [Hancock, 1985]. Установлено, что магистральные разломы северо-восточной ориентировки, субпараллельные границе Сибирской платформы и Саяно-Байкальской складчатой области, интерпретируются как правые сдвиги при ориентировке оси сжатия 90° . Разломы северо-западной ориентировки являются левыми сдвигами.

Расчет тенденции к сдвигу с учетом установленной ориентировки главных осей регионального ПНД позволил выявить наиболее гидравлически активные сегменты разрывных структур, которые характеризуются преимущественно северо-восточной и северо-западной ориентировками.

В пределах зон динамического влияния выявленных разрывов реконструированы параметры локальных ПНД и стадийность формирования данных структур: 1) северо-западные левые сдвиги при восток-северо-восточной ориентировке оси максимального сжатия; 2) магистральные правые сдвиги северо-восточного простирания, субширотные отрывы и субмеридиональные взбросы при субширотной ориентировке оси максимального сжатия; 3) север-северо-западные левые сдвиги при северо-западной ориентировке оси максимального сжатия.

Сформулированы и пространственно визуализированы структурные и тектонофизические критерии, определяющие размещение рудной минерализации в пределах площади. С помощью нормирования и определения коэффициентов веса каждого критерия создана структурная весовая прогнозно-поисковая модель.

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

Литература

Разработка методики автоматического выделения линеаментов на основе нейросетевого подхода / Г. А. Гришков, И. О. Нафигин, С. А. Устинов, В. А. Петров, В. А. Минаев // Исследование Земли из космоса. 2023. № 6. С. 86–97.

Hancock P. L. Brittle microtectonics: principles and practice // J. of Struct. Geol. 1985. Vol. 7, N 3/4. P. 437–457.

РОЛЬ АНАЛОГОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ИЗУЧЕНИИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ БАИМСКОЙ РУДНОЙ ЗОНЫ (ЗАПАДНАЯ ЧУКОТКА)

Н. С. Фролова, Н. А. Арешин

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Москва, Россия, n.s.frolova@mail.ru

Аналоговое моделирование конкретных структур, содержащих полезные ископаемые, представляет собой не только теоретический, но и практический интерес. Объектом нашего изучения является Баимская рудная зона (БРЗ), шириной 20 км и длиной до 170 км, состоящая из нескольких слегка извилистых пересекающихся крупных сдвигов. На первом этапе деформации осуществлялся левый сдвиг, в начале второго этапа внедрились раннемеловые гипабиссальные интрузии, с которыми связаны рудопроявления целого ряда металлов; показано, что их локализация определяется структурным фактором [Читалин, 2019]. Цель работы – аналоговое моделирование как значительной площади БРЗ с несколькими разломами, так и небольших участков с интрузивными массивами. Предполагалось сравнить полученные структурные парагенезы с существующими представлениями о строении и развитии БРЗ и с локализацией минерализации, наметить участки повышенной флюидопроницаемости.

Моделирование проводилось на сделанной по специальному заказу установке с подвижной столешницей, к которой крепились различные приспособления, как простые (для моделирования неоднородного по горизонтали и вертикали сдвига), так и сложное оригинальное приспособление для воспроизведения квазиоднородного сдвига в широкой зоне. Ряд моделей деформировался в условиях комбинированного сдвига. Эквивалентным материалом для моделирования БРЗ служила влажная каолиновая глина. Для имитации интрузивных тел лучше всего подошла фаянсовая глина (в некоторых экспериментах с прослоями угольного порошка), реже использовался песок. Результаты моделирования обрабатывались с помощью дешифрирования фотографий, построения роз-диаграмм, иногда осуществлялось разрезание моделей после частичного их высушивания.

Анализ нескольких десятков экспериментов позволил прийти к следующим результатам: 1) подтвердилось двухфазное развитие БРЗ; 2) выявлены устойчивые участки повышенной проницаемости (раскрытости) в «тенях давления» интрузий; 3) в моделях «интрузивных тел» с горизонтальной анизотропией развиваются послойные срывы и

надвиги (в природе имеют место аналогичные рудные штокверки); 4) надвигание края интрузивных массивов на вмещающие породы, фиксируемое в природе, не требует дополнительной фазы деформации; 5) если деформационные свойства «интрузивных тел» и вмещающих пород не сильно отличаются, то формируется система R-сколов, являющаяся аналогом меридиональных разрывов в природе, к которым тяготеют медно-порфировые месторождения и рудопроявления (между тем существует точка зрения [Читалин, 2019], что такая система – это разрывы растяжения); 6) наиболее крупные месторождения, в том числе известная «Песчанка», приурочены к тем близконтактовым зонам массивов, ориентировка которых совпадает с таковой R-сколов; 7) хорошо выраженная внутри и в окрестностях интрузивных тел система разрывов северо-восточного простирания, с которой связана преимущественно более поздняя и низкотемпературная золото-серебряная минерализация, была получена все в тех же условиях правого сдвига, но после смачивания глины в телах глицерином. Это снизило предел их прочности, что привело к формированию косых трещин отрыва. Возможно, в природе изменение деформационных свойств связано с остыванием интрузий.

Литература

Читалин А. Ф. Структурные парагенезы и рудная минерализация Баймской сдвиговой зоны, Западная Чукотка // Российская тектонофизика. К 100-летию юбилею Михаила Владимировича Гзовского : сб. ст. Апатиты : ФИЦ КНЦ РАН, 2019. С. 343–359.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В РАЗЛОМАХ, БЛИЗКИХ К ЧАРВАКСКОМУ ВОДОХРАНИЛИЩУ

Л. А. Хамидов¹, С. Г. Анварова¹, У. Ч. Жабборов^{1,2}

¹Институт сейсмологии им. Г. А. Мавлянова АН РУз, Ташкент, Узбекистан
sadokat.anvarova@mail.ru

²Национальный университет Узбекистана им. Мирзо Улугбека,
Ташкент, Узбекистан

В работе рассмотрена кластеризация проявления изменений слабой сейсмичности в разных сейсмоактивных разломах и геологических структурах на локальной территории зоны влияния водохранилища Чарвак. Это создаст возможности одновременного отслеживания сейсмических циклов разного периода по кластерам в зонах разломов, совмещая их с вариацией гидрологического режима эксплуатации водохранилищ. Также кластеризация позволит оценить уровень сейсмич-

ности, связанной с этими водохранилищами в рассматриваемой области на заданном интервале времени.

Водоохранилище Чарвак расположено в Чаткальской горной зоне, в 70 км к северо-востоку от Ташкента. В сейсмическом отношении оно находится в зоне 8–9-балльных землетрясений. Анализ работ, посвященных изучению сейсмических проявлений в зоне влияния Чарвакского водохранилища, свидетельствует об отсутствии единого локального каталога для районов исследований.

В связи с этим на основе имеющихся литературных данных была сформирована собственная база данных за последний 10-летний период, которая включает более 800 сейсмических событий. Опираясь на эти данные и каталоги землетрясений, мы составили местный каталог землетрясений для зоны влияния Чарвакского водохранилища. Он подготовлен в среде EXEL и полностью помещен в среду ArcGis. Построено пространственно-временное распределение землетрясения в зонах водохранилищ Восточного Узбекистана. Использован метод, предложенный F. Waldhauser и W. L. Ellsworth [2000], в котором сходство определяется квадратом евклидова расстояния. Наилучшие результаты можно получить, согласно [Analysis of the ... , 2017], когда пороговое значение $d = d_0^2$ квадрата Евклидова расстояния $(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2$ принимается равным от $1 \times M^2$ до $1,2 \times M^2$ км (M – магнитуда). После кластеризации землетрясения делятся на количество уплотнений эпицентров как кластеров с учетом того, что землетрясения распределяются неоднородно во времени. Предварительные результаты двумерных (аналогичных E. A. Roeloffs [1988]) расчетов позволили предположить, что это затяжная сейсмичность, которая зависит от частоты и амплитуды изменений уровня водохранилища, размеров резервуара и свойств основания. Она выражается более низкими энергетическими классами или отсутствием землетрясений в изучаемой зоне каждого кластера. По последовательностям проявления землетрясений с $K \geq 8$ в пределах зон выделенных кластеров в зоне Чарвакского водохранилища можно отметить, что оно увеличивает плотность землетрясений в зонах близких сейсмоактивных тектонических структур.

Литература

Analysis of the relationship between water level fluctuation and seismicity in the Three Gorges Reservoir (China) / Zhang L., Li J., Wei G. [et al.] // Geodesy and Geodynamics. 2017. Vol. 8. P. 96–102. URL: <https://ur.booksc.me/book/64590771/e0e0f7>

Roeloffs E. A. Fault Stability Changes Induced Beneath a Reservoir with Cyclic Variations in Water Level // J. Geophys. Res. 1988. Vol. 93. P. 2107–2124.

Waldhauser F., Ellsworth W. L. A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the Northern Hayward Fault // California, Bull. Seism. Soc. Am. 2000. Vol. 90, N 6. P. 1353–1368.

ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ВОКРУГ ТЕКТОНИЧЕСКИХ СТРУКТУР В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ТУПАЛАНГСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Л. А. Хамидов, Ф. Р. Артиков, Б. Р. Ганиева

Институт Сейсмологии им. Г. А. Мавлянова АН РУз
hamidov_l@mail.ru

На основе составленного каталога локальных землетрясений ближней зоны Тупалангского водохранилища получена возможность более корректной оценки распределения землетрясений в окрестностях разломов в период его эксплуатации за 2011–2023 гг. Главными элементами тектонической структурой в районе Тупалангского водохранилища являются Южно-Тяньшаньский, Дехканабадский и Шурчинский разломы, которые наиболее сейсмоактивны за последний период времени [Seismicity caused by ... , 2023; Хамидов, 2023]. Выбранная зона разломов является одним из наиболее протяженных структурных разрывных нарушений, простирающихся с юго-запада на северо-восток территории Южного Узбекистана. Поверхности главных смесителей наклонены на юго-запад под углом от 70 до 90° [Артиков, 2023]. Анализ плотности распределения локальных землетрясений вокруг этих разломов показал, что возможность одновременного отслеживания сейсмических циклов разного периода по кластерам, совмещая их с вариацией режима эксплуатации, позволила оценить уровень сейсмичности, возможно, вызванный эксплуатацией Тупалангского водохранилища. Кластеризация изучена в рассматриваемой области на заданном интервале времени. Возникновение кластеров с низкой плотностью землетрясений связано с концентрацией дополнительных напряжений, приводящих к хрупким разрушениям при сдвиге по разломам (например, Южно-Тяньшаньский, Дехканабадский и Шурчинский), а с большой плотностью – снятием напряжения при слабых землетрясениях.

Для проведения модельных расчетов выбраны модуль Юнга и коэффициент Пуассона, осредненные по всей площади. По всем элементам введены значения смещений согласно данным современных движений и натурных геодезических съемок вертикальных смещений по реперам (на каждый элемент – одно осредненное значение). Для каждого разрыва рассчитаны коэффициенты Кулона (трения покоя), всего 16 значений. В результате расчета определены компоненты напряжений в виде четырехугольной матрицы. В одномерной матрице (столбец) находятся значения смещений узлов и внутренних точек, включа-

ющие смещение основания водохранилища. Постепенно снимая избыточные напряжения (по участкам сейсмических сбросов), построены вариации поля от события к событию. Анализируя плотности распределения землетрясений вокруг примыкающих разломов за исследованный период, выявлены вариации сброса напряжений, а также деформации земной коры, возникающие в выделенных кластерах разрывных зон. Обосновано сведение результатов в единую систему, позволяющую совместно алгоритмизировать математические задачи, решаемые отдельно на основе моделей геодинамики.

Литература

Артиков Ф. Р. Распределения землетрясений вблизи Тупалангского водохранилища // Актуальные проблемы обеспечения сейсмической безопасности населения и территорий : тр. Междунар. науч. конф., 3 окт. 2023 г., ИС АН РУз, Ташкент, Узбекистан. С. 146–152.

Хамидов Л. А. Сбросы напряжений при землетрясениях, возникающих в разломах вокруг водохранилищ Южного Узбекистана // Доклады АН РУз. 2023. № 4. С. 103–109.

Seismicity caused by the hydrological regime of large reservoirs / L. Khamidov, F. Artikov, K. Khamidov [et al.] // CONMECHYDRO. J. E3S Web of Conferences. 2023. 365, 03043. P. 1–11

ОТРАЖЕНИЕ РАЗЛОМНЫХ ЗОН ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА В ЕГО ГЛУБИННОЙ СКОРОСТНОЙ СТРУКТУРЕ

**М. А. Хритова^{1,2}, В. В. Мордвинова¹, Е. А. Кобелева^{1,2},
М. М. Кобелев^{1,2}**

¹Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия, hritova@crust.irk.ru

²Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН, Иркутск, Россия

Положение полуострова Камчатка в переходной зоне между материком и океаном определяет его сложную глубинную структуру, которая выявляется в первую очередь по характеру изменения скорости сейсмических волн, как по глубине, так и по площади. Неоднородности, в основном, объясняются субдукционным механизмом и деформацией плит в коллизионной зоне [Глубинная модель ... , 2007]. По результатам геологических и геофизических исследований Камчатки сделаны выводы о слоисто-блоковой структуре полуострова и различии в строении земной коры и верхней мантии Северной и Южной Камчатки.

Методом продольной приемной функции (*P-to-S*) [Vinnik, 1977; Receiver functions ... , 1993] по телесеismicким записям 11 станций Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН за период 2011–2013 гг. был построен скоростной разрез коры и подкоревой мантии под Восточно-Камчатским вулканическим поясом до глубины 80 км. С целью уточ-

нения и верификации полученных результатов произведен анализ материалов наблюдений этих же станций за период 2014–2016 гг.

На итоговом разрезе поперечных волн обнаруживаются слоистая структура коры и верхние довольно неоднородные 45 км подкоровой мантии. Вслед за предшественниками выявленную нами структуру можно назвать слоисто-блоковой. На северо-востоке разреза коромантийный переход определяется по сгущению изолиний скоростей 3,8–4 км/с на глубине 37–39 км. Несколько южнее за Мохо принимаем более пологую изолинию 3,9. В основном наблюдается сходство выделенной нами границы Мохо с мощностью земной коры на схеме в работе [Глубинная модель ... , 2007], что поддерживает полученную скоростную модель Восточно-Камчатского вулканического пояса. Под сейсмостанциями Петропавловск и Авача установлено сложное строение коры: скоростные аномалии на глубинах 1–30 км выявляют зоны поперечных глубинных разломов, пересекающих полуостров, например Петропавловск-Малкинская зона поперечных дислокаций [Мороз, Гонтовая, 2018]. Литосфера Восточной Камчатки в интервале глубин ~40–60 км отчетливо выделяется слоем повышенной скорости. Глубже 60–80 км он подстилается слоем пониженных скоростей – астеносферным слоем мантийной литосферы, что согласуется с томографической моделью, рассчитанной по данным регионального каталога землетрясений КФ ФИЦ ЕГС РАН [Мороз, Гонтовая, 2018].

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00682-24) и с использованием данных, полученных на УНУ СИЗК МАК.

Литература

Глубинная модель верхней мантии Камчатки / Л. И. Гонтовая, В. В. Гордиенко, С. В. Попруженко [и др.] // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. № 1 (9). С. 90–104.

Мороз Ю. Ф., Гонтовая Л. И. О глубинном строении Южной Камчатки по геофизическим данным // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9, № 4. С. 1147–1161. DOI: 10.5800/GT-2018-9-4-0387

Receiver functions for the Tien Shan analog broadband network: Contrasts in the evolution of structures across the Talass–Fergana fault / G. L. Kosarev, N. V. Petersen, L. P. Vinnik [et al.] // J. Geophys. Res. 1993. Vol. 98, N B3. P. 4437–4448.

Vinnik L. P. Detection of waves converted from P to S in the mantle // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1977. Vol. 15. P. 39–45.

НОВЫЕ ПАЛЕОСЕЙСМИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ О ГОЛОЦЕНОВОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ТУНКИНСКОГО РАЗЛОМА (ЮГО-ЗАПАДНЫЙ СЕГМЕНТ БАЙКАЛЬСКОГО РИФТА)

А. А. Чеботарев¹, С. Г. Аржанников¹, А. В. Аржанникова¹,
J.-F. Ritz², А. В. Авагян³

¹Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия, che@crust.irk.ru

²Geosciences Montpellier Laboratory, CNRS, University of Montpellier, France

³Институт геологических наук Национальной АН Армении, Ереван, Армения

Тункинская система впадин является субширотной частью юго-западного сегмента Байкальского рифта, развитие которой контролируется Тункинским и Главным Саянским разломами. Современная активность разломов представляет потенциальную угрозу для иркутской агломерации, и оценка интервалов повторяемости крупных землетрясений является принципиально важной в решении задач сейсмобезопасности региона. Предыдущими исследованиями [Characterizing the present-day ... , 2018] было установлено, что за последние 15 тыс. лет в зонах Тункинского и Главного Саянского разломов произошло четыре разрывообразующих землетрясения с интервалом 3,9–4,2 тыс. лет. Однако данные возраста палеоземлетрясений заключены в широкий диапазон. Целью нашего исследования было уточнение возраста поверхностных разрывов палеоземлетрясений (т. е. сейсмических событий с $M > 6$), деформировавших чехол позднекайнозойских отложений в пределах Торской котловины Тункинской системы впадин, и возрастная корреляция этих древних сейсмособытий с землетрясениями, зафиксированными по другим сегментам Тункинского разлома и смежным разломам Байкальского рифта. Работа была проведена на северной границе Торской котловины, в зоне Тункинского разлома. Этот участок разлома развивается как левосторонний взбросо-сдвиг, испытав тектоническую инверсию в позднем плейстоцене-голоцене. Взбросо-сдвиговая кинематика прослеживается также на палеосейсмических структурах Главного Саянского разлома [Палеосейсмодислокации и связанные ... , 2003; Смекалин, 2008; Characterizing the present-day ... , 2018]. Были заложены две траншеи вкрест простирания Тункинского разлома и проведены локальные топографические работы. Задокументированы следы двух палеоземлетрясений. Нам удалось уточнить возраст событий, соответствующих второму и третьему палеоземлетрясениям, отмеченным J.-F. Ritz [Characterizing the present-day ... , 2018]. По данным радиоуглеродного анализа, они произошли между 2870–

3120 и 7785–7890 л. н. соответственно. Мы показали, что в пределах юго-западного сегмента Байкальского рифта землетрясения магнитудой ~ 7 – $7,5$, вероятно, происходят во временных кластерах вдоль разломов, объединенных общей динамикой развития [Chery, Carretier, Ritz, 2001], хотя и удаленных на значительные расстояния.

Литература

Палеосейсмодислокации и связанные с ними палеоземлетрясения в зоне Тункинского разлома (юго-западное Прибайкалье) / А. В. Чипизубов [и др.] // Геология и геофизика. 2003. Т. 44, № 6. С. 585–600.

Смекалин О. П. Изучение палеосейсмогенных деформаций Южного Прибайкалья. М. : ИФЗ РАН, 2008. 101 с.

Characterizing the present-day activity of the Tunka and Sayan faults within their relay zone (western Baikal rift system, Russia) / J.-F. Ritz [et al.] // Tectonics. 2018. Vol. 37, N 5. P. 1376–1392.

Chéry J., Carretier S., Ritz J-F. Postseismic stress transfert explains time clustering of large earthquakes in Mongolia // EPSL. 2001. 194. P. 277–286.

ЗОННО-БЛОКОВАЯ СТРУКТУРА И ТЕКТНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИБАЙКАЛЬСКОЙ ОКРАИНЫ СИБИРСКОГО КРАТОНА

А. В. Черемных¹, И. К. Декабрёв¹, А. С. Черемных^{1,2}

¹Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия, cherem@crust.irk.ru

²ОПАО «Росгео» «ИГП», Иркутск, Россия

Геологическая история развития регионов определяет условия формирования и активизации разломных зон. Парагенез разломной зоны представлен совокупностью более мелких разрывов, связанных с формированием основного разломного сместителя. В проведенном исследовании мы, вслед за К. Ж. Семинским, оперируем термином «зона», под которым понимаем выход на дневную поверхность дизъюнктивных дислокаций, сформировавшихся в вытянутой по латерали области. У такой зоны сгущения непротяженных разрывов может отсутствовать непрерывный основной сместитель – магистральный разлом, что не позволяет отнести ее к разломным в традиционном понимании. Однако подобные зоны повышенной трещиноватости, или скрытые разломы, широко распространены в пределах платформенных областей. В таких зонах могут сформироваться структурные ловушки для углеводородного сырья.

Нами проведено изучение зонно-блоковой структуры и тектонических напряжений в пределах прибайкальской окраины Сибирского кратона, на отрезке Иркутск – Улькан. Для картирования зон был вы-

полнен линеаментный анализ на базе цифровых моделей рельефа (ЦМР), составленных посредством обработки космических снимков высокого разрешения. В результате были откартированы линейные элементы рельефа, которые позволили охарактеризовать нарушенность верхней части земной коры разрывными нарушениями (так как большинство линеаментов ассоциируется с разломами), в данном случае – краевой части Сибирского кратона. Дополнительные построения схем плотности линеаментов и градиента рельефа позволили провести оси зон, которые трассировались по цепочкам максимумов рассчитанных параметров. Зоны, откартированные путем оконтуривания областей концентрации линеаментов, отличаются спецификой внутренней структуры, состоящей из линеаментов различной пространственной ориентировки, в зависимости от кинематического типа основного разлома.

Зонно-блоковая структура района исследования формировалась стадийно, поэтому было важно установить специфику тектонических напряжений и кинематические типы разломных зон разного возраста. Данная задача решалась на основе геолого-структурных данных, а также материала, полученного при линеаментном анализе.

Проведенное исследование подтвердило, что в пределах прибайкальской части Сибирского кратона выделяются четыре основных этапа деформации: палеозойского (один этап) и кайнозойского (три этапа) возраста. Ось палеозойского сжатия ортогональна краевому шву кратона. Раннекайнозойское сдвиговое поле с субмеридиональной ориентировкой оси сжатия и субширотной оси растяжения широко проявлено на всей СВ части площади, и в ее ЮЗ части – в зонах Прихребтового, Приморского и Ангаро-Бугульдейского разломов.

Поле растяжения позднего кайнозоя реконструировано в разломных зонах краевой части кратона, что вызвано влиянием рифтогенеза. Наименее изучены поля тектонических напряжений позднего кайнозоя с субширотным направлением оси сжатия. Так, причины деформации пород в условиях сдвига с субширотным направлением оси сжатия и субмеридиональным простиранием оси растяжения в пределах ЮЗ части площади еще предстоит выяснить.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ОСЛАБЛЕННЫХ ЗОН И РАЗЛОМОВ В АРКТИКЕ

А. А. Черных^{1,3}, И. В. Буддо^{1,2,3}, И. А. Шелохов^{1,2,3}

¹Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

²Иркутский национальный исследовательский технический университет
Иркутск, Россия

³Научный центр изучения Арктики, Салехард, Россия

В районах Российской Арктики значительную роль в формировании бугров пучения могут играть глубинные флюидодинамические процессы, происходящие в пределах обширных субвертикальных ослабленных зон трещиноватости, наложенных друг на друга [Нежданов, Смирнов, 2021]. Для успешного исследования строения арктической мерзлоты наряду с прямыми геологическими методами могут применяться различные геофизические методы.

Объектом исследования является разрез участка в пределах п-ова Ямал, находящегося в зоне сплошного развития многолетнемерзлых пород.

Предварительный этап экспедиции – выбор оптимального комплекса методов исследований. Для обоснования данного выбора выполнено математическое моделирование электрических, электромагнитных и волновых полей на основе построенных физико-геологических моделей [2]. По результатам математического моделирования выявлено, что все типы заложенных в модель объектов позволяет картировать электроразведка методом зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ). Методы постоянного тока и георадара имеют существенные ограничения в глубинности исследований. Сейсморазведка может использоваться в комплексе геофизических методов для картирования структурных особенностей разреза, в основном субгоризонтальных границ.

В 2023 г. состоялась полевая экспедиция, направленная на изучение внутреннего строения бугра пучения, обнаруженного в 40 км к востоку от Салехарда. Выбранный на подготовительном этапе исследований комплекс геофизических методов был скорректирован: вместо малоглубинной активной применена пассивная сейсморазведка, позволяющая на значительных глубинах картировать возможные ослабленные зоны, которые могут являться каналами флюидомиграции.

Результаты комплексной интерпретации электроразведки ЗСБ и пассивной сейсморазведки, проведенных в районе расположения бугра пучения, показали сходство в строении верхней части разреза и распо-

ложении тектонических нарушений. Отмечается дифференциация верхней части разреза на четыре комплекса по сопротивлению и скорости распространения поперечных волн.

При анализе разреза электротомографии достаточно четко фиксируется ядро бугра пучения и находящаяся под ним субвертикальная контрастная аномалия, характерная для глубины 6 м и более. По данным георадара аномалию контролируют два тектонических нарушения, выявленных до глубины 6 м. Можно предположить, что это канал, по которому происходит подпитка бугра, за счет чего происходит активный рост.

Наличие контрастных аномалий под бугром пучения отмечается по каждому из примененных методов, что может являться дополнительным доказательством существования зоны неоднородности под бугром пучения.

Работа выполнена в рамках темы № 1023110300018-4-1.5.4 Министерства науки и высшего образования РФ в молодежной лаборатории комплексных исследований Арктики ИЗК СО РАН.

Литература

Нежданов А. А., Смирнов А. С. Флюидодинамическая интерпретация данных. Тюмень : Тюмен. индустр. ун-т, 2021. 286 с.

Imaging Arctic Permafrost: Modeling for Choice of Geophysical Methods / I. Buddo, N. Misyurkeeva, I. Shelokhov, E. Chuvilin, A. Chernikh, A. Smirnov // Geosciences. 2022. Vol. 12. P. 389.

ИЗУЧЕНИЕ СТРОЕНИЯ РАЗЛОМНЫХ ЗОН ГОРНОГО АЛТАЯ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ

И. О. Шапаренко, Н. Н. Неведрова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН
Новосибирск, Россия, shaparenkoio@ipgg.sbras.ru

На территории Горного Алтая специалистами лаборатории электромагнитных полей ИНГГ СО РАН проводятся ежегодные полевые работы комплексом методов геоэлектрики, в том числе привлекается электротомография (ЭТ). Электротомография – современный, широко востребованный метод постоянного тока, который позволяет построить детальные двумерные и трехмерные геоэлектрические модели среды по данным, полученным на поверхности земли или в скважинах. Для изучения параметров разломных структур в мировой практике и в России электротомография привлекается относительно недавно. В связи с

этим в настоящее время разрабатываются и применяются новые подходы к интерпретации данных ЭТ при изучении разломных структур [Семинский, Зарипов, Оленченко, 2016].

Сложная система активных кайнозойских разломов определяет современное строение Горного Алтая. Протяженные хребты и высокогорные плато чередуются в его пределах с межгорными впадинами. Блоковое строение земной коры этой территории формируют крупные кайнозойские разломы, которые ограничивают впадины и, отчетливо проявляясь в рельефе вследствие значительных амплитуд смещения, исследуются геоморфологическими методами. Внутриблоковые разломные зоны и разломы области перехода к осадочному заполнению крупных впадин часто перекрыты современными отложениями. Как следствие, для их картирования применяются методы геофизики.

Опираясь на предварительные геологические и геофизические данные, на территории Горного Алтая были выбраны участки с разломными структурами, на которых проведены измерения методом ЭТ. В результате интерпретации полевых данных для Чуйской, Курайской и Уймонской разломных зон были определены интервалы изменения УЭС: 20–300 Ом·м. В многолетнемерзлых породах значения повышаются до 1500 Ом·м. Ширина разломных зон по данным ЭТ составляет от 20 до 150 м. Выполненное далее численное моделирование и инверсия синтетических данных с использованием нескольких программных комплексов позволили повысить достоверность результатов, что особенно актуально в случае недостатка априорной информации [Анализ эффективности ... , 2023].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Программы фундаментальных научных исследований № FWZZ-2022-0025.

Литература

Анализ эффективности программных комплексов электротомографии для интерпретации полевых данных в сейсмоактивных районах (на примере Горного Алтая) / И. О. Шапаренко, Н. Н. Невердова, А. В. Мариненко [и др.] // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2023. № 2. С. 54.

Семинский К. Ж., Зарипов Р. М., Оленченко В. В. Тектонофизический подход к интерпретации данных малоглубинной электротомографии разломных зон // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 9. С. 1715–1729.

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ФЛЮИДОНАСЫЩЕННЫХ РАЗЛОМНЫХ ЗОН КОМПЛЕКСОМ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ НА ВОСТОЧНОМ ПОБЕРЕЖЬЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ

Л. П. Шашкева, И. В. Буддо, И. А. Шелохов

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия
slp@crust.irk.ru

Геофизические исследования на восточном побережье оз. Байкал проводились с целью оконтуривания зон повышенных перспектив наличия трещинных зон, насыщенных термальными водами. Термальными мы называем воды, температура которых превышает 20 °С. Гидротермы выходят на поверхность по зонам тектонических нарушений и трещин [Ломоносов, Лысак, 1967]. Актуальность подобных исследований определяется необходимостью открытия новых геотермальных источников.

Значительная часть гидротермальных источников Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) расположена вдоль берега оз. Байкал. Всего в пределах БРЗ насчитывается свыше 50 термальных источников, изливающихся на земную поверхность с температурой до 84 °С и суммарным дебитом 600 л/с [Голубев, 1991].

Комплекс геофизических методов включал: 1) магниторазведку на БПЛА; 2) электроразведочные работы методом мЗСБ; 3) тепловизионную съемку на БПЛА.

По полученным магниторазведочным данным были составлены карты градиента магнитного поля и полного вектора напряженности магнитного поля. По карте градиента магнитного поля представилось возможным выделить и оценить ориентировку предполагаемых зон тектонических нарушений, основная часть которых протягивается с юго-запада на северо-восток площади исследования.

По данным электроразведочных работ методом мЗСБ было построено 11 геоэлектрических разрезов, 11 разрезов кажущегося сопротивления и карты продольного сопротивления основных геоэлектрических горизонтов, а также карта суммарной проводимости.

Территория исследования была полностью покрыта профилями тепловизионной съемки, что позволило построить карту теплового поля и выявить аномальные участки, которые могут быть связаны с наличием глубинного источника тепла.

Проведенные геофизические исследования имеют большое значение для дальнейшего изучения и освоения гидротермальных ресурсов восточного побережья оз. Байкал. Полученные материалы позволят определить потенциал использованного комплекса методов и выделить перспективные области для поиска скрытых гидротерм.

Литература

Голубев В. А. Модель гидротермального стока и его влияние на геотермическое поле Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика. 1991. № 12. С. 102–109.

Ломоносов И. С., Лысак С. В. Термальные воды Сибирской платформы и ее горноскладчатого обрамления // Советская геология. 1967. № 5. С. 110–115.

СТРУКТУРА, ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ И АМПЛИТУДЫ СМЕЩЕНИЯ КРУПНЕЙШИХ РАЗЛОМОВ АЛЬПИЙСКОГО БОЛЬШОГО КАВКАЗА ПО ДАННЫМ СБАЛАНСИРОВАННОЙ МОДЕЛИ СКЛАДЧАТОГО ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА

Ф. Л. Яковлев

Институт физики Земли РАН, Москва, Россия, yak@ifz.ru

В описаниях структуры Большого Кавказа доминируют варианты его строения в виде аккреционной призмы [Дотдугев, 1986], в которых два надвига, Главный Кавказский и Южного склона, имеют смещения в десятки километров с севера на юг. Исследования складчатости на основе детальных структурных пересечений [Шолпо, Рогожин, Гончаров, 1993] путем построения сбалансированных профилей по специальному методу (26 пересечений общей длиной более 600 км) позволили разработать модель строения осадочного чехла в его полном объеме для трех регионов [Яковлев, 2015; 2024]. Были получены данные о 108 «структурных ячейках», занимающих 5–7 км вдоль профиля и охватывающих по вертикали весь чехол. Модель имеет три стадии развития: 1) доскладчатую постседиментационную; 2) постскладчатую доорогенную; 3) посторогенную современную. Для ячеек вычисляются следующие параметры: глубина кровли фундамента для трех стадий, величина укорочения, амплитуда поднятия (и размыва) верхней части чехла. Данные о современной глубине кровли фундамента для блоков в разных крыльях разломов позволяют вычислять амплитуды вертикальных и горизонтальных смещений по разломам и проверять их модели. Указанные выше два крупных разлома хорошо описаны по материалам сбалансированной модели.

Все структуры севернее Главного Кавказского надвига испытали слабую складчатость перед поздней юрой. В отличие от мощных флишевых толщ, накопленных в осевых зонах южнее, здесь верхняя часть чехла представлен маломощными карбонатными толщами. В пределах Юго-Восточного Кавказа сбалансированная модель показала структуру и историю движений по надвигу. Глубина кровли фундамента в смежных ячейках с юга на север оказалась одинаковой (–13,0 и –13,3 км). На второй стадии фундамент южной зоны был глубже (–34,9 км), чем в северной (–25,8 км), а современное поднятие кровли структуры было существенно выше (21,9 и 12,5 км). В профиле Рагданчай поверхность сместителя надвига падает на юг, более молодые толщи аалена здесь надвинуты на тоар. Из этого следует, что Главный Кавказский надвиг не может иметь крупных смещений [Яковлев, 2015].

Надвиг Южного склона Большого Кавказа изучен в районе пос. Кваиси. Здесь глубина кровли фундамента к северу в Чиаурской зоне составляет –18,8 км, а в Гагро-Джавской зоне южнее (в Закавказском массиве) фундамент находится на глубине около –10 км, но амплитуда поднятия северного блока также больше (9,9 км и 1–2 км). Наличие сброса, а не надвига на уровне фундамента говорит о совместном укорочении чехла и фундамента и о некорректности аккреционной модели. Этот надвиг в Юго-Восточном Кавказе представлен Зангинским разломом [Яковлев, 2024]. Здесь глубина фундамента в Вандамской (Закавказский массив) и Ковдагской (Большой Кавказ) зонах оказалась одинаковой (–16,9 и –17,3 км). На второй стадии ячейка Кавказа по фундаменту находилась глубже ячейки в срединном массиве (–34,6 и –26,0 км), и сейчас она сильнее поднята (17,3 против 9,1 км). Таким образом, Южный надвиг также геометрически не может иметь больших смещений с севера на юг. Одинаковое укорочение чехла и фундамента Кавказа объясняется уплотнением здесь пород коры до мантийных значений в нижней части структуры коры.

Литература

- Дотдугев С. И. О покровном строении Большого Кавказа // Геотектоника. 1986. № 5. С. 94–106.
- Шолпо В. Н., Рогожин Е. А., Гончаров М. А. Складчатость Большого Кавказа. М.: Наука, 1993. 192 с.
- Яковлев Ф. Л. Многограновый деформационный анализ линейной складчатости на примере альпийского Большого Кавказа : дис. д-ра геол.-минерал. наук. М., 2015. 472 с.
- Яковлев Ф. Л. Полное сбалансированное структурное пересечение восточной части Большого Кавказа и проблема оценки ширины бассейна Неотетиса // Материалы 55-го Тектонического совещания. Т. 2. М.: ГЕОС, 2024. С. 272–276.

GEOLOGICAL EVOLUTION OF THE HADAASAN METAMORPHIC CORE COMPLEX

Javkhlanbold Dorjsuren

Department of Geology and Hydrogeology, School of Geology and Mining Engineering,
Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaatar, Mongolia,
djavkhlanbold@gmail.com

The Hadaasan metamorphic core complex is located in the Mongol-Okhotsk folded belt at the junction between the Khentey and Khangay Mountain ranges. A metamorphic core complex can be classified into three plates: the cover or upper plate, the detachment zone, and the basal or lower plate.

The Mongol-Okhotsk suture gave rise to a series of right-lateral strike-slip fault systems, characterized by releasing and restraining bends that formed as the faults propagated. The restraining bends led to the development of positive flower structures and mountain building, while the releasing bends created pull-apart basins. The Hadaasan metamorphic core complex was likely exhumed to the surface due to the northwest-southeast directed opening of a pull-apart basin occupying a dilatational stepover bridging the Tarna and Bad right-lateral strike-slip faults. The Tarna and Bad strike-slip fault system is well-exposed as a cataclasite-mylonite zone on the western banks of the Tarna river and on the western foothills of the Khugnukhan mountain, about 2 km from where the MUST geology summer field camp is located.

The transtensional basin forming at the Tarna-Bad releasing bend took the form of rotating "domino" blocks bounded by synthetic normal faults, resulting in a rolling-hinge style deformation. Consequently, unmetamorphosed cover sediments are sliced and attenuated by numerous arrays of moderate- to low-angle normal faults. For example, gently tilted strata of conglomerates are repeatedly offset by normal faults in a "stepped" fashion and are confined to distinct fault blocks.

At deeper crustal levels, the normal faults fed into a flat-lying migmatite zone, and with continued release of strain within it, eventually gave way to the detachment fault zone. The detachment fault zone was dominated by simple shearing parallel to schistosity and gneissosity, resulting in mineral and stretching lineations, and an augen texture omnipresent in the fault rocks—porphyroblasts are found to be of both sigma and delta types. Other structural features indicating detachment faulting include S-C structures, back-rotation of S-C fabrics between synthetic extensional shear bands, mica fish, en echelon veins, and so on.

At the crustal depth of the brittle-ductile transition zone, the formation of gneiss and migmatite occurred, alongside the generation of a magma chamber by partial melting. Concurrent with the onset of the exhumation of the Hadaasan metamorphic core complex, magma generated at greater depths by partial melting advanced rather rapidly to restore isostatic equilibrium. Consequently, the detachment fault zone, which had been doming at a steady rate along the migmatite front, abruptly bent, resulting in drag folding manifested by widespread occurrences of recumbent isoclinal folds in the brittle-ductile transition zone. Moreover, the residual fluids of the magmatic melts were emplaced along fracture networks and tectonic foliations, forming pegmatite, aplite, and quartz veins that are largely concordant with tectonic foliations and often discordant with veins of preceding phases. Such veins also commonly appear to have been folded in harmony with their host rocks (i. e., migmatite, gneiss, schist), boudinaged, and offset by younger faults.

**OCEANIC CORE COMPLEXES:
IS SUBDUCTION ALONG ACCRETING RIDGE – TRANSFORM
FAULT INTERSECTIONS POSSIBLE?**

Y. Mart

Recanati Institute of Maritime Studies, University of Haifa, Haifa, Israel,
yossimart@gmail.com

Subduction is probably the critical tectonic process that shapes planet earth, and analog tectonic experiments of this process, using the high-speed centrifuge of Uppsala University, show that subduction would initiate spontaneously at sites where two lithospheric slabs of contrasting densities are juxtaposed, even without lateral compression or negative crustal buoyancy [Mart et al., 2005]. Settings where such spontaneous initiation of subduction could take place are at the intersections of transform faults and slow-spreading ridges, where a segment of the older and denser oceanic lithosphere would be juxtaposed to the fresh and lighter lithosphere of the ridge. The slow spreading rate is required so that the density contrast between the juxtaposed fresh and older crustal segments would be enough to initiate the thrusting of the older and denser slab under the lighter ridge. Considering that the densities of the experimental materials are not very different from earth materials, the observed density contrast of ca. 200 kg/m³ between the slabs would probably be sufficient to generate spontaneous subduction of

the older and denser oceanic basalt under the fresh and lighter axial crust. Considering further that the top of the asthenosphere would be at depth of nearly 10 km under the accreting ridge, the average thermal gradient under the ridge – transform fault intersection would be ca. 130°/km [Mart, 2022]. Furthermore, due to the high pressure, the seawater at depth of several km would be flowing liquids even at temperatures of 500° and higher [Turcotte, Morgan, 2013]. The seawater at such temperatures would probably alter the mineralogy of the pyroxenes and the olivines in the subducting slab into serpentines at relatively shallow depth of 4–5 km. These serpentinites, which are distinctly low-density, would be likely to ascend diapirically, dragging with them blocks of asthenospheric magma that would lithify to peridotite inside the diapiric ascent, to produce serpentinite-peridotite oceanic core complexes at the flank of slow spreading ridges near their junctions with the transform faults. Friction at the top of such diapirs would generate their nearly flat and remineralized surfaces. Such secondary features would resemble fault plains and thus could look like the expected shape of low-angle normal detachment faults commonly attributed the oceanic core complexes.

It is of interest to note that the high thermal gradient of the subducting crustal slab at ridge-transform junctions and the lithostatic pressure at depth of ca 4 km would enable the spontaneous occurrence of organic molecules through Sabatier or Haber reactions. Sabatier reaction would convert CO₂ into methane under pressure and at 400° temperature, at the catalytic presence of Ni, while Haber process would derive ammonia (NH₃) from reacting the air-borne nitrogen with very hot H₂O steam under high pressure. The possibility of spontaneous generation of these organic chemical molecules the ridge – transform subduction is of interest.

References

Mart Y., Aharonov E., Mulugeta G. et al. Analog modeling of the initiation of subduction. *Geophys. J. Int.*, 2005, vol. 160, pp. 1081–1091.

Mart Y. Serpentinite diapirs and the evolution of oceanic core complexes. *Environmental Science and Ecology: Current Research*, 2022, vol. 3, pp. 1054–1060.

Turcotte D. L., Morgan J. P. The physics of magma migration and mantle flow beneath a Mid-Ocean Ridge, in: *Mantle Flow and Melt Generation at Mid-Ocean Ridges. American Geophysical Union*, 2013, pp. 155–182.

DEVELOPMENT OF MULTI-PHYSICAL PARAMETER OBSERVATION AND FAULT SUB-INSTABILITY RESEARCH

**Yanshuang Guo, Yan-Qun Zhuo, Peixun Liu, Shunyun Chen,
Liqiang Liu and Jin Ma**

State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake
Administration, Beijing, China, guoysh@ies.ac.cn

A new method for earthquake prediction research is formally proposed in 2012, Fault Sub-Instability, based on energy balance and fault stability. A cycle of earthquake may be divided into four stages in time series: 1) Stability, ideally elastic deformation with loading, No preslip or damage with energy rise; 2) Meta-stability, inelastic with small local preslip or damage with still energy rise; 3) Sub-Instability, from slowly unloading to quasi-statically unloading with certain magnitude of preslip or damage accumulation, energy release after the whole peak stress; 4) Instability, dynamically unloading with entire fault slip or rupture, fast energy release. A series of stick-slip experiments to simulate earthquake cycle in laboratory were conducted to observe the properties of fault sub-instability by use of granite samples with a diagonally precut fault. During load, the microrupture events, deformation along fault strike and fault slip, and the full deformation and thermal temperature from the whole sample, were measured with continuous acoustic emission (AE) acquisition of 3M sampling, strain recorder up to 0.5M sampling, high speed camera of 10 k frames per second and thermal imaging system of 97 pfs. The experimental results show that the sub-instability can be identified by the evolution of stress, strain, displacement, temperature and acoustic emission /microseismic activity before fault slip instability. There is also a sub-instability stage before natural strong earthquakes, like Ms6.4 Yangbi Earthquake, 2021. This provides a new blueprint for the study of earthquake prediction, and the preliminary field exploration brings a ray of light for the application of sub-instability from indoor to field.

UNRAVELING THE ROLES OF FAULT ASPERITIES OVER EARTHQUAKE CYCLES

**Lifeng Wang¹, Shiqing Xu², Yanqun Zhuo¹,
Peixun Liu¹, Shengli Ma¹**

¹State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing, China, wanglf@ies.ac.cn

²Department of Earth and Space Sciences, Southern University of Science and Technology, Shenzhen, China

Fault asperities can produce concentrated slips during large earthquakes and intensify damage. However, how asperities control fault behavior during other phases of the earthquake cycle remains poorly known. Here, we conduct friction experiment on a laboratory fault featuring two prominent geometric asperities to directly image their influences on long-term and short-term seismicity, and the nucleation and propagation of the mainshock. The laboratory observations and supporting numerical simulations reveal that one asperity located in the fault interior behaves firstly as a mechanical attractor to long-term seismicity, then a barrier to preseismic slow slip, and ultimately a source of large coseismic slip. In contrast, another asperity located near the fault margin primarily undergoes persistent aseismic slip throughout most phases of the earthquake cycle. These results provide new insights into how asperities partition strain across a broad spatiotemporal domain, establishing a physical link between long-term and short-term fault behaviors and the occurrence of large earthquakes.

LARGE-DISPLACEMENT FRICTIONAL PROPERTIES OF FAULT UNDER HYDROTHERMAL CONDITIONS

Lu Yao^{1*}, Wei Feng^{1,2}, Weifeng Qin¹, Gang Song¹, Shengli Ma¹,
Giulio Di Toro^{2,3}, Toshihiko Shimamoto¹

¹State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing, China, luyao@ies.ac.cn

²Dipartimento di Geoscienze, Università degli Studi di Padova, Padua, Italy

³Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Rome, Italy

Frictional properties of faults exert first-order control on the fault slip behavior and the complex processes of seismic events and aseismic slip. Extensive studies have suggested that the frictional properties of faults are mainly affected by their mineral composition and deformation conditions (e. g., ambient temperature and pressure). Yet, due to technical challenges, there is only limited research exploring the slip displacement effects on fault friction under hydrothermal conditions. Actually, slip displacements of natural faults are typically orders of magnitude larger than those of experimental faults, thus the displacement dependence of rock friction (both frictional strength and stability) is a topic of crucial importance when we extrapolate experimental results to the Earth.

By using a rotary shear apparatus equipped with an externally-heated hydrothermal pressure vessel, we have performed large-displacement (up to ~3.0 m) friction experiments on various rocks (gabbro, chlorite gouge, illite/chlorite-rich shale) under temperature of 25 to 400 °C, pore water pressure up to 60 MPa, and slip rates ranging from ~10 nm/s to 100 mm/s in recent years. We observed that the slip displacement can significantly affect both the (1) frictional strength and (2) frictional stability. For (1), we observed that a) the simulated bare gabbro faults show dramatic slip weakening in the presence of the liquid or supercritical pore water, regardless of slip velocity, which is likely linked with the formation of weak minerals through fluid-rock interactions; b) the chlorite gouges show temperature-dependent slip strengthening due to the breakdown of the interlayer structure and the increased cohesion with increasing temperature. Regarding (2), we revealed that c) the friction velocity-dependence parameter ($a-b$) of shale decreases from positive to negative values with slip displacement, due to the distortion of the crystal structures of illite and chlorite and the resultant amorphization process; d) ($a-b$) of the gabbro gouges increases from negative to positive values with slip displacements, attributed to the formation of weak minerals. These results demonstrate that both frictional strength and stability can be significantly changed with increasing slip displacements, although possibly in different manners depending on rock composition. The observed slip dependence of fault friction under hydrothermal conditions may greatly contribute to the complexities of fault slip behavior in nature during earthquake cycles.

LABORATORY STUDY ON THE ACCELERATED PROPAGATION OF WEAKENING ZONES ON A HETEROGENEOUS FAULT

Yan-Qun Zhuo, Peixun Liu, Yanshuang Guo, Shunyun Chen

State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing, China, zhuoyq@ies.ac.cn

The accelerated propagation of weakening fault zones indicates the spontaneous evolution to the fault instability, which is an important information for predicting the fault instability. Thus, studying the spatiotemporal characteristics and the mechanical conditions of the accelerated propagation of weakening fault zones is of great significance for searching for the inevitable information of earthquakes. A granodiorite sample with a saw-cut heterogeneous fault was loaded in a biaxial press machine to generate stick-slip motions to simulate the occurrence of natural earthquakes. The spatiotemporal evolutions of the weakening fault zones during the stick-slip cycles were studied using strain rosettes, displacement sensors, and acoustic emission detectors. The results showed that: (1) the accelerated propagation of the weakening fault zone begins shortly after the peak macroscopic loading stress (i. e. the starting point of meta-instability stage); (2) The failure of the strong contact zone in the middle of the fault leads to the onset of the accelerated propagation of the weakening fault zone; (3) The accelerated propagation of the weakening fault zone is spatiotemporally consistent with the acoustic emissions and fault pre-slip; (4) The length of the accelerated propagating weakening fault zone can be fitted as a power function of time; (5) Loading rate, macroscopic normal stress, and slip history have cross effects on the velocity of the accelerated propagating weakening fault zone. The experimental results indicate that it is possible to identify the occurrence of the accelerated propagation of weakening fault zones in nature by using dense and continuous measurements of fault displacement, seismic activity, and crustal stress combined with discrimination of fault heterogeneity.

Научное издание

РАЗЛОМООБРАЗОВАНИЕ В ЛИТОСФЕРЕ И СОПУТСТВУЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ: ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЙ АСПЕКТ

Тезисы докладов
Всероссийской коференции, посвященной 75-летию
ИЗК СО РАН, 45-летию лаборатории тектонофизики,
90-летию со дня рождения профессора С. И. Шермана
Иркутск, 16–21 сентября 2024 г.

ISBN 978-5-9624-2306-7

Корректор *Ю. А. Балашова*

*На обложке использован рисунок
из статьи С. И. Шермана*

Подписано в печать 10.09.2024. Формат 60×90 1/16
Усл. печ. л. 8,6. Тираж 100 экз. Заказ 114

ИЗДАТЕЛЬСТВО ИГУ
664082, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 124