

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Иркутский государственный университет»

# **РАЗЛОМООБРАЗОВАНИЕ В ЛИТОСФЕРЕ И СОПУТСТВУЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ: ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ**

Тезисы докладов  
Всероссийского совещания, посвященного  
памяти профессора С. И. Шермана  
Иркутск, 26–30 апреля 2021 г.



УДК 551.24  
ББК 26.3  
Р17

Рекомендовано к печати  
ученым советом ФГБУН ИЗК СО РАН  
Протокол № 4 от 01.04.2021

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

Р17 **Разломообразование** в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ : тезисы докладов Всероссийского совещания, посвященного памяти профессора С. И. Шермана. Иркутск, 26–30 апреля 2021 г. / ФГБУН ИЗК СО РАН ; ФГБОУ ВО «ИГУ» ; отв. ред. К. Ж. Семинский. – Иркутск : Издательство ИГУ, 2021. – 233 с. <https://doi.org/10.26516/978-5-9624-1919-0.2021.1-233>

**ISBN 978-5-9624-1919-0**

Представлены фундаментальные разработки механизмов формирования разноранговых разломно-блоковых структур литосферы, проблемы реконструкции поля напряжений в сложных динамических обстановках, а также исследования пространственно-временных взаимоотношений разломообразования и связанных с ним сопутствующих процессов, которые проявляются в виде сейсмической и разнотипной флюидной активности.

Предназначено широкому кругу специалистов в области тектонофизики, современной геодинамики, механики разрушения, структурной геологии, геофизики, рудообразования, гидрогеологии и инженерной геологии, которые занимаются исследованием разломной структуры и процессов, связанных с деструкцией.

УДК 551.24  
ББК 26.3

ISBN 978-5-9624-1919-0

© ФГБУН ИЗК СО РАН, 2021  
© ФГБОУ ВО «ИГУ», 2021

# СОДЕРЖАНИЕ

От оргкомитета .....	13
Краткий очерк творческого пути и научной деятельности профессора С. И. Шермана .....	15

## РАЗДЕЛ 1. ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОННО-БЛОКОВОЙ И РАЗЛОМНО-БЛОКОВОЙ СТРУКТУРЫ ЛИТОСФЕРЫ. ЛИТОСФЕРНЫЕ ПЛИТЫ, ВНУТРИПЛИТНАЯ ИЕРАРХИЯ БЛОКОВ И ИХ КИНЕМАТИКА

<b>Алексеев Р. С., Ребецкий Ю. Л.</b> Модель эволюции Гималайско-Тибетского орогена .....	21
<b>Бондарь И. В., Маринин А. В.</b> Сравнение напряженно-деформированного состояния трех крупных мегаблоков Кольского полуострова .....	22
<b>Бурзунова Ю. П.</b> Применение различных методов анализа трещиноватости для реконструкции полей тектонических напряжений (на примере зоны Морского разлома в Западном Прибайкалье) .....	24
<b>Гафуров Р. Т., Умуразов Р. А.</b> Изучение структуры отражающей поверхности терригенных отложений нижней – средней юры площади Хаккуль по материалам сейсморазведки .....	25
<b>Дубинин Е. П.</b> Слоисто-блоковое строение океанической литосферы .....	27
<b>Кузин А. М.</b> Упругие свойства геосреды и образование волноводов земной коры .....	28
<b>Кухарик Е. А., Матвеев А. В.</b> Активизированные кольцевые структуры на территории юго-западной Беларуси .....	30
<b>Кушнарёва А. В., Худолей А. К., Пасенко А. М., Крючкова Л. Ю.</b> Сравнение методов количественной оценки деформации на примере метапесчаников Таласского Алатау .....	31
<b>Леонов М. Г.</b> «Внеразломные» зоны объемной дезинтеграции горных пород: геологические примеры и возможные интерпретации .....	33
<b>Лукьянов А. Е.</b> Роль подвижных тектонических нарушений как элементов самоорганизации земной коры .....	34
<b>Мансуров А. Н.</b> Распределение тензора современных деформаций земной коры Памира и прилегающих территорий по GPS-данным в сравнении с сеймотектоническими деформациями .....	35
<b>Маринин А. В., Тверитинова Т. Ю.</b> Тектонофизические данные по строению покровно-надвиговых нарушений Северо-Западного Кавказа .....	37

<b>Мирошниченко А. И., Леви К. Г., Саньков В. А., Лухнев А. В., Лухнева О. Ф.</b> Многомерный статистический анализ геолого-геофизических параметров литосферы Байкало-Монгольского региона .....	38
<b>Мирошниченко А. И., Радзиминович Н. А., Лухнев А. В., Зувев Ф. Л., Дэмбэрэл С., Эрдэнэзул Д., Улзийбат М.</b> Современные деформации на Улан-Баторском геодинамическом полигоне по данным GPS-геодезии .....	40
<b>Попков И. В.</b> Разломная тектоника Северо-Западного Кавказа и Западного Предкавказья: структурные построения и натурные наблюдения .....	42
<b>Радзиминович Н. А., Тубанов Ц. А., Санжиева Д. П.-Д., Мирошниченко А. И.</b> Активные разломы Южно-Байкальской впадины по сейсмологическим данным .....	43
<b>Ребецкий Ю. Л.</b> Закономерности природного напряженного состояния в разных геодинамических обстановках: континентальные орогенные, зоны субдукции и спрединга .....	45
<b>Саньков В. А., Парфеевец А. В.</b> Поле тектонических напряжений территории Монголии в позднем кайнозое .....	46
<b>Саргсян Р. С., Казарян К. С.</b> Установление зоны динамического влияния Памбак-Севанского разлома (Республика Армения) по структурно-геоморфологическим признакам и сейсмологическим данным .....	48
<b>Сим Л. А., Маринин А. В.</b> Неотектонические напряжения и граница между Амурской и Охотской микроплитами на полуострове Шмидта (остров Сахалин) .....	49
<b>Суворов В. Д., Павлов Е. В., Мельник Е. А.</b> Сейсмоплотностные неоднородности и изостазия земной коры восточной окраины Сибирского кратаона (опорный профиль 3-ДВ) .....	51
<b>Тверитинова Т. Ю.</b> Альпийские дизъюнктивы разновозрастных структурно-вещественных комплексов .....	52
<b>Умуразаков Р. А., Дононов Ж. У.</b> О некоторых особенностях разрывных и складчатых деформаций долины Мачайдарьи (Байсунтау, юго-западные отроги Гиссара) .....	54
<b>Яковлев Ф. Л., Горбатов Е. С.</b> Складчатая структура Большого Кавказа, геодинамические механизмы его формирования и история вертикальных движений по крупным разломам .....	55
<b>Gatinsky Yu. G., Prokhorova T. V.</b> Two Types of the Lithosphere Destruction in Central Asia .....	57

РАЗДЕЛ 2. СТРУКТУРА КРУПНЫХ РАЗЛОМНЫХ ЗОН ЛИТОСФЕРЫ. АКТИВНЫЕ РАЗЛОМЫ И КОНТРОЛЬ СИНХРОННЫХ И СОПУТСТВУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ

<b>Аржанников С. Г., Броше Р., Аржанникова А. В., Иванов А. В., Демонгерова Е. И., Бурле Д., Янсон Д.</b> Новые данные о возрасте террас острова Большой Ушканий (озеро Байкал) .....	59
---	----

<b>Аржанникова А. В., Аржанников С. Г., Чеботарев А. А., Ritz J.-F.</b> Палеосейсмогенные деформации в зоне Мондинского разлома (Тункинская система впадин, Байкальский рифт) .....	60
<b>Баталева Е. А.</b> Глубинная геоэлектрическая структура разломных зон Северного Тянь-Шаня .....	62
<b>Боголюбский В. А., Дубинин Е. П.</b> Зависимость величины оффсета и морфометрических параметров трансформных разломов от геодинамических особенностей развития провинций Атлантического океана .....	63
<b>Гайдай Н. К.</b> Отражение скрытого разлома фундамента в плотностной структуре земной коры Мякит-Хурчанского рудного района .....	65
<b>Гильманова Г. З.</b> Разломы северо-восточного и северо-западного направлений Приамурья по комплексному анализу рельефа и геофизических данных .....	66
<b>Гордиенко И. В., Жатнуев Н. С.</b> Разломообразование и флюидные процессы на конвергентных границах литосферных плит .....	68
<b>Жижерин В. С.</b> Современная тектоника и сейсмичность Верхнего Приамурья .....	69
<b>Иванченко Г. Н., Горбунова Э. М.</b> Исследование активных зон Прибайкалья методами компьютерного дешифрирования .....	70
<b>Имаева Л. П., Имаев В. С., Козьмин Б. М.</b> Структурно-динамическая модель сдвиговой системы разломов сейсмотектонической зоны Черского .....	72
<b>Кобелев М. М., Мордвинова В. В., Хритова М. А., Кобелева Е. А.</b> Влияние разломообразования на анизотропию скоростной структуры земной коры и верхней мантии южной окраины Сибирского крата .....	73
<b>Кузьмин Ю. О.</b> Современная геодинамическая активность разломов (индуцирование, взаимодействие, распространение) .....	75
<b>Лиханов И. И., Реньев Ж.-Л.</b> Приразломные тектониты Енисейского кряжа: <i>P-T-t-d</i> -эволюция и геодинамические модели формирования .....	76
<b>Лунина О. В., Гладков А. А., Денисенко И. А.</b> Современное разрывообразование в зоне влияния Зундукского разлома на побережье Малого моря озера Байкал .....	78
<b>Лунина О. В., Денисенко И. А.</b> Особенности одноактных вертикальных смещений вдоль дельтового разлома в голоценовых отложениях различной компетентности (Байкальский рифт) .....	79
<b>Манилов Ю. Ф., Иволга Е. Г.</b> Дизъюнктивные системы области сочленения континент – океан южной части Дальнего Востока России .....	81
<b>Москаленко А. Н., Павловская Е. А., Кушнарера А. В., Худoley А. К.</b> Обзор методов реконструкции полей напряжений по неоднородным выборкам данных по зеркалам и бороздам скольжения .....	82

<b>Никонов А. А.</b> О глубине проникновения открытых расколов и трещин Новейшего времени на Кольском полуострове (Фенноскандинавский кристаллический щит) .....	84
<b>Пашевин А. М., Субботин А. А., Литвинов Н. А.</b> Деструкция литосферы юга Сибирской платформы .....	85
<b>Платонова С. Г., Скрипко В. В.</b> Морфология надвиговой зоны северного фаса Алтая .....	87
<b>Рассказов С. В., Чебыкин Е. П., Ильясова А. М., Чувашова И. С., Снопков С. В.</b> Проникновение воды Южного Байкала в сейсмоактивные береговые разломы: оценка деформаций расплавленного сэндвича милонитов Главного Саянского разлома по изотопам U и Sr .....	88
<b>Рогожин Е. А., Горбатов А. В., Степанова М. Ю., Харазова Ю. В., Андреева Н. В., Овсяченко А. Н., Ларьков А. С., Сысолин А. И., Чэнь Цзе, Лю Цзяо.</b> Глубинное строение Северо-Западного Кавказа по новым геолого-геофизическим данным .....	90
<b>Семинский А. К., Семинский К. Ж.</b> Общие закономерности вариаций радона в подземных водах Южного Прибайкалья под влиянием землетрясений .....	91
<b>Семинский И. К., Поспеев А. В.</b> Глубинное геоэлектрическое строение Ангарского разлома по новейшим данным МТЗ .....	92
<b>Сим Л. А., Гордеев Н. А.</b> О рифтогенезе хребта Гаккеля на Лаптевоморском континентальном склоне .....	94
<b>Сметанин А. В., Марченко А. К., Марченко И. Н.</b> Некоторые показатели тектонической раздробленности верхней коры Сибирской платформы и ее окружения по гравиметрическим данным .....	95
<b>Тагильцев С. Н., Лукьянов А. Е.</b> Использование геомеханики и тектонофизики при решении гидрогеологических задач .....	96
<b>Фаттахов Е. А.</b> Сопоставление спектрально-временных характеристик деформационных процессов разломных зон в сейсмоактивных регионах .....	98
<b>Хритова М. А., Мордвинова В. В., Кобелева Е. А., Кобелев М. М., Сениюков С. Л., Назарова З. А.</b> Отражение разломных зон полуострова Камчатка в его глубинной структуре .....	99
<b>Чеботарев А. А., Аржаникова А. В., Аржаников С. Г.</b> Установление взаимосвязи между долгосрочными скоростями смещения по сегментам Тункинского разлома и морфометрическими параметрами приразломной зоны .....	101
<b>Черемных А. В.</b> Внутренняя структура и напряженно-деформированное состояние крупных разломных зон юга Восточной Сибири .....	102
<b>Чувашова И. С., Рассказов С. В., Коломиец В. Л., Будаев Р. Ц., Хассан А., Аль Хамуд А.</b> Развитие структуры Южно-Байкальского бассейна от эоцена до плейстоцена в пространственно-временных соотношениях седиментационных и вулканических событий .....	103

РАЗДЕЛ 3. ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
РАЗЛОМООБРАЗОВАНИЯ И ДРУГИХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

<b>Агранов Г. Д., Дубинин Е. П., Грохольский А. Л.</b> Физическое моделирование формирования микроконтинентов и краевых плато Северной Атлантики .....	105
<b>Ахмедов Х. Р., Умурзаков Р. А.</b> Палеотектодинамический анализ мезозойско-кайнозойского развития локальных структур Бухаро-Хивинской нефтегазоносной области .....	106
<b>Ахметов А. Ж., Смолин И. Ю.</b> Оценка напряженно-деформированного состояния геологических объектов Сибирского кратона на основе профиля «Кимберлит-1980» .....	108
<b>Борняков С. А, Пантелеев И. А., Каримова А. А., Салко Д. В.</b> Экспериментальное исследование пространственной передачи деформаций в упруговязкопластичной модели литосферы.....	109
<b>Бызов Л. М.</b> Оценка скоростей позднекайнозойских вертикальных движений горного обрамления впадин Байкальской рифтовой системы по результатам математического моделирования эволюции рельефа .....	111
<b>Вахромеев А. Г., Сверкунов С. А., Акчурин Р. Х.</b> Скважина как «онлайн-система» гидравлических тестирований .....	112
<b>Данилов Я. А., Дубинин Е. П., Грохольский А. Л.</b> Физическое моделирование особенностей структурообразования в спрединговых хребтах Индийского океана, подверженных влиянию термических аномалий .....	114
<b>Дементьева И. Е., Попков В. И., Попков И. В.</b> Жильные залежи углеводородов, связанные с разломами .....	116
<b>Казакбасва А. А., Макаров П. В., Смолин И. Ю.</b> Механизм генерации и особенности распространения межразломных автосоли-тонных возмущений .....	117
<b>Каримова А. А., Борняков С. А., Пантелеев И. А.</b> Основные закономерности развития разрывной структуры сдвиговых зон: по результатам физического моделирования .....	118
<b>Кузьмин Д. К.</b> Анализ деформационных процессов в разломных зонах месторождений углеводородов .....	119
<b>Леонов М. Г.</b> Гранитные протрузии – распространенный тип залежей углеводородов в кристаллическом фундаменте .....	120
<b>Лермонтова А. С.</b> Математическое моделирование развития сдвиговой зоны от системы сколов Риделя к магистральному разлому .....	122
<b>Макаров П. В.</b> Автосоли-тонная концепция деформационных и сейсмических процессов в земной коре .....	123
<b>Макаров П. В.</b> Автосоли-тонная концепция медленной динамики в геосредах .....	124

<b>Мягков Д. С., Ребецкий Ю. Л.</b> Математическое моделирование формирования напряженно-деформированного состояния литосферы Японской зоны субдукции региона Хонсю до и после землетрясения Тохоку .....	125
<b>Никонов А. И.</b> Палеогеодинамический анализ зон аномальных деформаций в разрезе антиклинальных платформенных структур .....	126
<b>Пантелеев И. А., Окунев В. И., Новиков В. А., Кочарян Г. Г.</b> Пространственно-временные закономерности прерывистого скольжения по модельному протяженному разлому .....	128
<b>Перышкин А. Ю., Макаров П. В.</b> Внутриразломные автосолиитоны. Моделирование процесса миграции землетрясений по разлому .....	129
<b>Перышкин А. Ю., Макаров П. В.</b> Деформационные автосолиитоны как триггерные механизмы землетрясений .....	130
<b>Попков В. И.</b> Листрические разломы и нефтегазоносность .....	131
<b>Ребецкий Ю. Л., Стефанов Ю. П., Войтенко В. Н., Бакеев Р. А., Еремин М. О.</b> Тектонофизика и геомеханика в решении проблемы формирования коллекторов рудных залежей .....	132
<b>Смолин И. Ю., Макаров П. В., Микушина В. А.</b> Механизмы генерации и структура фронтов бегущих автосолиитонов в деформируемой прочной среде .....	134
<b>Тагильцев С. Н., Лукьянов А. Е.</b> Использование геомеханики и тектонофизики при решении гидрогеологических задач .....	135
<b>Тверитинова Т. Ю., Белобородов Д. Е.</b> Взаимосвязь грязевого вулканизма с зонами концентрации деформаций в Керченско-Таманской зоне .....	136
<b>Толстова А. И., Дубинин Е. П., Грохольский А. Л.</b> Формирование шовных зон Метеор и Айлос Оркадос при перескоке оси спрединга в Южной Атлантике (физическое моделирование) .....	137
<b>Фролова Н. С., Мишакина А. А., Корбутяк А. Н.</b> Аналоговое моделирование структур, формирующихся на платформах при смене режима растяжения сдвиговым режимом .....	139
<b>Шеменда А. И.</b> Механика образования сетей трещин растяжения: геологические данные, экспериментальное и численное моделирование .....	140

РАЗДЕЛ 4. ФЛЮИДНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ РАЗЛОМНЫХ ЗОН  
СТРУКТУРНЫЙ КОНТРОЛЬ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И МЕСТОРОЖДЕНИЙ  
УГЛЕВОДОРОДОВ

<b>Горбунова Э. М., Беседина А. Н., Кабыченко Н. В., Батухтин И. В., Петухова С. М.</b> Влияние сейсмического воздействия на деформирование водонасыщенного коллектора по данным прецизионного гидрогеологического мониторинга .....	142
--	-----



<b>Горшков А. И., Ливинский А. И., Новикова О. В.</b> Положение крупномасштабных рудных месторождений в линейно-блоковой структуре Алтае-Саянского региона .....	144
<b>Джуманиязов Д. И., Каримова Ф. Б.</b> Эволюция Северо-Нуратинского глубинного разлома .....	145
<b>Кисин А. Ю., Карасева Е. С., Мурзин В. В.</b> Структурная позиция золотого и демантоидного оруденения в альпинотипных гипербахитов Главного Уральского разлома .....	147
<b>Кисин А. Ю., Притчин М. Е., Огородников В. Н., Поленов Ю. А., Озорнин Д. А.</b> Структурный контроль Светлинского месторождения золота и Светлинского месторождения горного хрусталя (Южный Урал) .....	148
<b>Костровицкий С. И.</b> Глубинные разломы, их роль в формировании кимберлитов .....	150
<b>Кравченко А. А., Лоскутов Е. Е., Мельников А. И., Тимофеев В. Ф., Кириллин Е. И., Березкин В. И., Округин А. В., Попов Н. В.</b> Тектонические структуры и металлогения Алданской гранулитогнейсовой области на юге Северо-Азиатского кратона .....	151
<b>Мельников А. В.</b> Кольцевые структуры Приамурья и их роль в размещении россыпей золота .....	153
<b>Михайлов С. А., Чернов М. Л., Зайцев Д. Н., Нугманов И. И.</b> Наземный сейсмометрический мониторинг техногенной и естественной трещиноватости и определение современного поля напряжений земной коры .....	154
<b>Морозова Л. Н.</b> Геотектоническая позиция месторождений литиевых пегматитов Кольского полуострова .....	156
<b>Нематуллаев С. Ю., Мусаев А. М., Каримова Ф. Б., Джуманиязов Д. И.</b> Металлогенические черты рудовмещающих пород Чармитанского рудного поля .....	157
<b>Ружич В. В., Вахромеев А. Г., Сверкунов С. А.</b> Снижение избыточной упругой энергии в глубинных сейсмоопасных сегментах разломов через наклонно направленные скважины путем волновых гидравлических воздействий .....	159
<b>Семинский Ж. В.</b> Рудолокализирующая роль разрывной тектоники в различных геодинамических обстановках Восточной Сибири .....	161
<b>Семинский К. Ж.</b> Основы тектонофизического подхода к анализу разломно-блоковой структуры и напряженно-деформированного состояния осадочного чехла на месторождениях углеводородного сырья .....	164

#### РАЗДЕЛ 5. СЕЙСМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС В РАЗЛОМНО-БЛОКОВОЙ СТРУКТУРЕ ЛИТОСФЕРЫ

<b>Александров П. Н., Баталева Е. А., Бобровский В. В.</b> Инструментальное изучение активности геологических разломов .....	167
--	-----

<b>Арсеньев С. А.</b> Моделирование очагов землетрясений в разломах литосферы .....	168
<b>Беленович Т. Я., Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б., Неверов Н. А.</b> Пространственно-временные особенности геодинамического режима юго-востока Евразии .....	169
<b>Бержинский Ю. А., Бержинская Л. П., Ордынская А. П.</b> Оценка уязвимости зданий с учетом сейсмического износа конструкций для расчета сейсмического риска .....	171
<b>Беседина А. Н.</b> Исследование микросейсмического фона с помощью модифицированного сейсмометра СМ-ЗКВ вблизи горнодобывающих предприятий .....	172
<b>Беседина А. Н., Кишкина С. Б., Павлов Д. В., Кочарян Г. Г.</b> Сейсмические процессы в системе разломов Курской магнитной аномалии .....	174
<b>Борняков С. А., Салко Д. В.</b> Особенности проявления деформационных предвестников сильных землетрясений в Прибайкалье .....	175
<b>Виляев А. В., Жантаев Ж. Ш.</b> Динамика сейсмичности Северного Тянь-Шаня на базе статистического анализа .....	177
<b>Гаврилов В. А., Дешеревский А. В., Соломатин А. В., Пантелеев И. А.</b> О подходах к краткосрочному прогнозированию сильнейших землетрясений зоны Авачинского залива (Камчатка) .....	178
<b>Герман В. И.</b> Оценка исходной сейсмичности для территории Красноярска .....	179
<b>Герман В. И.</b> Подobie пространственной и временной структуры сейсмичности .....	181
<b>Гилева Н. А., Мельникова В. И., Радзиминович Я. Б., Тубанов Ц. А.</b> Сильные землетрясения Прибайкалья в 2020–2021 гг. ....	182
<b>Горшков А. И., Новикова О. В., Соловьев А. А.</b> Прогноз мест возникновения сильных землетрясений на основе иерархической линейно-блоковой структуры земной коры .....	184
<b>Гуфельд И. Л.</b> Тупик разрывной модели сейсмического процесса и реализация краткосрочной сейсмической опасности на основе дегазационной модели .....	185
<b>Добрынина А. А., Саньков В. А., Мналле П.</b> Сейсмоакустические эффекты Быстринского землетрясения 21 сентября 2020 г. ....	186
<b>Дядьков П. Г., Козлова М. П., Михеева А. В., Романенко Ю. М., Гилева Н. А.</b> Сейсмическая активность центральной впадины озера Байкал как отражение разломно-блоковой структуры земной коры .....	188
<b>Епонешникова Л. Ю., Дучков А. А., Тубанов Ц. А.</b> Уточнение трехмерной структуры сейсмических аномалий в районе озера Байкал .....	189
<b>Завьялов А. Д., Зотов О. Д., Гульельми А. В.</b> Новый подход к определению размера очаговой зоны землетрясений .....	190
<b>Копылова Г. Н., Болдина С. В.</b> Современные флюидодинамические процессы в сейсмоактивном регионе .....	192

<b>Король С. А., Саньков А. В., Добрынина А. А.</b> Связь микро-сейсмических шумов с землетрясениями .....	193
<b>Кочарян Г. Г.</b> Зарождение и остановка землетрясений .....	195
<b>Лебедева М. А., Саньков В. А., Добрынина А. А.</b> Первые результаты исследований Хубсугульского землетрясения (12.01.2021, $M_w = 6,8$ ) методом дифференциальной РСА-интерферометрии .....	196
<b>Левина Е. А.</b> Периодичности в сейсмическом режиме Байкальской рифтовой зоны и их возможные причины .....	198
<b>Никонов А. А.</b> Определение диспозиции и масштабности очаговых разломов сильнейших землетрясений Восточного Кавказа с VIII в. н. э. по характеристикам высшей изосейсты макросейсмического поля .....	199
<b>Никонов А. А., Шварев С. В.</b> Озовые гряды как структурно-тектонические маркеры: деформации в рельефе и в позднеледниковых отложениях – отражение новейшей тектоники и геодинамики (на примере восточной части Фенноскандинавского кристаллического щита) .....	201
<b>Новиков В. А., Ружин Ю. Я., Сорокин В. М., Яценко А. К.</b> Космическая погода и землетрясения: возможный механизм воздействия солнечных вспышек и магнитных бурь на деформационные процессы в земной коре .....	202
<b>Остапчук А. А., Попов М. Ф., Кочарян Г. Г.</b> Закономерности кластеризации гипоцентров сейсмических событий в плоскости тектонического разлома .....	204
<b>Пеллинен В. А., Алексеев С. В., Лебедева Е. А., Светлаков А. А.</b> Экзогенные процессы в долинах рек Сенца и Жомболок (Восточный Саян) .....	205
<b>Предин П. А., Добрынина А. А., Тубанов Ц. А.</b> Внутреннее поглощение и рассеяние сейсмических волн в литосфере центральной части Байкальской рифтовой системы .....	208
<b>Радзиминович Я. Б., Гилева Н. А., Тубанов Ц. А., Лухнева О. Ф., Новопашина А. В., Цыдыпова Л. Р.</b> Макросейсмические проявления Кударинского землетрясения 9 декабря 2020 г. ( $M_w = 5,5$ ) на Среднем Байкале .....	209
<b>Ребецкий Ю. Л.</b> Современное состояние геомеханики и тектонофизики в оценке сейсмической опасности .....	211
<b>Ружич В. В., Вахромеев А. Г., Сверкунов С. А.</b> О демпфировании очагов землетрясений закачками растворов в сегменты разломов через глубокие скважины .....	212
<b>Ружич В. В., Левина Е. А., Пономарева Е. И.</b> Сейсмопрогностический мониторинг в Байкальской рифтовой зоне .....	214
<b>Саньков А. В., Добрынина А. А., Саньков В. А.</b> Активные разломы земной коры Прибайкалья в поле микросейсмических колебаний .....	215
<b>Семенов Р. М., Лопатин М. Н.</b> Причины вариаций концентраций растворенного гелия в подземных водах Прибайкалья .....	217

<b>Смекалин О. П., Чипизубов А. В., Имаев В. С.</b> Сейсмический режим разломов очага Могодского землетрясения в голоцене по палеосейсмическим данным .....	218
<b>Смольников Г. Я., Баркин Ю. В., Баркин М. Ю.</b> Гравитационные взаимодействия небесных тел гелиосферы .....	220
<b>Тарасов Н. Т.</b> Влияние электромагнитного излучения Солнца и геомагнитных бурь на тектонические напряжения и сейсмичность Земли .....	221
<b>Филин А. Ф.</b> Использование современных информационных технологий в моделировании сейсмического процесса .....	222
<b>Филиппова А. И., Букчин Б. Г., Фомочкина А. С., Мельникова В. И., Радзиминович Я. Б., Гилева Н. А.</b> Очаговые параметры Быстринского землетрясения 21 сентября 2020 г. ( $M_w = 5,6$ ) по телесейсмическим данным .....	224
<b>Чебыкин Е. П., Ильясова А. М., Рассказов С. В., Чувашова И. С., Борняков С. А., Снопков С. В.</b> Култукское сочленение активных разломов Южно-Байкальской впадины и Главного Саянского разлома: чувствительный полигон гидрогеохимического мониторинга подготовки сильного землетрясения .....	225
<b>Чепцов В. В., Добрынина А. А., Саньков А. А., Чечельницкий В. В.</b> Связь сейсмических моментов землетрясений с региональным геодинамическим режимом .....	226
<b>Чечельницкий В. В.</b> Измерение относительных деформаций при землетрясениях и взрывах сейсмическими станциями .....	228
<b>Шварев С. В.</b> Сейсмичность в рыхлых отложениях Зимнего берега Белого моря (Архангельская область) .....	229
<b>Шварев С. В.</b> Тектоническая позиция сейсмогенных нарушений в четвертичных отложениях Терского берега Белого моря (Кольский полуостров) .....	231
<b>Яковлев Ф. Л., Габсатарова И. П., Стаховская Р. Ю.</b> Квазипериодическая циклическая периодичность сейсмичности восточной части Большого Кавказа за последние 200 лет и среднесрочный прогноз сейсмической активности региона .....	232

## ОТ ОРГКОМИТЕТА

В сборнике представлены тезисы докладов Всероссийского совещания с участием приглашенных исследователей из других стран «Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ», посвященное памяти профессора С. И. Шермана.

Семен Ийнович Шерман – основатель сибирской тектонофизической школы, костяк которой составляют ученики профессора – 18 кандидатов и 5 докторов наук, а также десятки специалистов, развивающих в настоящее время тектонофизическое направление исследований в Институте земной коры СО РАН (ИЗК СО РАН) и других научных и производственных учреждениях Сибири. Более 40 лет назад – 29 ноября 1979 г. – С. И. Шерман организовал лабораторию тектонофизики в ИЗК СО РАН, в течение 25 лет был ее заведующим и затем еще более десяти лет плодотворно работал в созданном им научном коллективе.

Всероссийское совещание «Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ» 2021 г. является уже пятым научным форумом, организованным ИЗК СО РАН и посвященным тектонофизике разломообразования в литосфере. Предыдущие конференции (1990, 2003, 2009, 2014 гг.) прошли успешно и отличались широким охватом фундаментальных проблем тектонофизики, а также большим числом (более 100) участников, представляющих главные центры современных исследований в данной области.

В рамках совещания освещены основные тенденции исследований в трех главных направлениях тектонофизики. Первое посвящено фундаментальным разработкам механизмов формирования разноранговых разломно-блоковых структур литосферы, вопросам определения тектонофизических условий разломообразования на разных глубинах, проблемам реконструкции поля напряжений при формировании сложных тектонических структур, вопросам избирательной активизации разрывных сетей при различных режимах деформирования с акцентом на результатах физического и математического моделирования. Второе направление объединяет исследования пространственно-временных взаимоотношений разломообразования и связанных с ним сопутствующих процессов, которые проявляются в виде сейсмической и разнотипной флюидной активности. Третье направление аккумулирует наиболее общие закономерности, полученные в рамках двух первых направлений, и заключается в разработке комплексных моделей межблоковых зон, в основе которых лежат ключевые особенности разломного строения, а содержатель-

ную часть составляют обусловленные им закономерности сейсмического процесса, рудолокализации, а также эманаций, миграции и концентрации природных газов.

Особенностью Всероссийского совещания с участием приглашенных исследователей из других стран «Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ», посвященного памяти профессора С. И. Шермана, является привлечение к обсуждению перечисленных проблем специалистов из смежных областей геологии и геофизики, предметом исследований которых являются процессы, сопутствующие деструкции.

*К. Ж. Семинский*

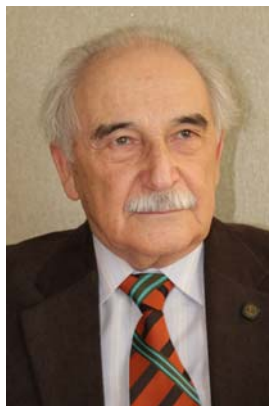
# КРАТКИЙ ОЧЕРК ТВОРЧЕСКОГО ПУТИ И НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОФЕССОРА С. И. ШЕРМАНА

## Основные даты жизни

Шерман Семен Иойнович родился 30 апреля 1934 г. в г. Лугины (Украина, Житомирская обл.). Среднюю школу окончил в 1951 г. в г. Житомире. После ее окончания более полутора лет работал помощником киномеханика в кинотеатре им. Ив. Франко г. Житомира.

В 1953 г. семья переехала в г. Ангарск Иркутской области. В том же году С. И. Шерман поступил на геолого-разведочный факультет Иркутского горно-металлургического института (в настоящее время Иркутский национальный исследовательский технический университет) и в 1958 г. с отличием окончил его по специальности «Геологическая съемка и разведка месторождений полезных ископаемых» с присвоением квалификации горного инженера-геолога. Был рекомендован для работы в Горно-металлургическом институте в должности ассистента. Научно-исследовательская работа под руководством профессора В. Н. Даниловича по изучению тектонической трещиноватости и деформаций геологических тел еще в студенческие годы расширила знания С. И. Шермана в области деструкции горных пород, влияющей на миграцию подземных вод. Специализация оказалась востребованной: С. И. Шерман в 1959 г. был приглашен на должность младшего научного сотрудника в Институт геологии Восточно-Сибирского филиала АН СССР (позже Институт земной коры СО РАН, ныне ФГБУН «ИЗК СО РАН»), где в течение 57 лет, до конца яркой творческой жизни, Семен Иойнович проводил научные исследования процесса разломообразования в литосфере.

В Институте земной коры СО РАН с 1959 по 1968 г. С. И. Шерман работал в должности младшего, затем научного сотрудника, с 1968 по 1979 г. – в должности старшего научного сотрудника. В 1979 г. он организовал лабораторию тектонофизики, до 2004 г. был ее заведующим, а с 2004 до 2017 г. – главным научным сотрудником.



Параллельно с 1978 по 2009 г. Сергей Иойнович Шерман работал по совместительству на геолого-разведочном факультете Иркутского государственного технического университета в должности доцента, а с 1980 г. – профессора.

В 1956 г. С. И. Шерман сочетался браком со студенткой геологического факультета Иркутского государственного университета С. В. Лысак, которая в 1958 г., после окончания вуза с отличием, была направлена на работу в Институт геологии ВСФ СО АН СССР. С этого времени Семен Иойнович и Светлана Васильевна работали в Институте земной коры в разных лабораториях. Доктор геолого-минералогических наук, лауреат премии Ленинского комсомола в области науки, С. В. Лысак закончила трудовую деятельность в 2010 г. в должности ведущего научного сотрудника. В семье родились двое детей: дочь Е. С. Шерман (Свердлова), 1958 г. р., ныне кандидат медицинских наук, гинеколог; сын М. С. Шерман, 1965 г. р., живет в г. Бердске Новосибирской области, работает в г. Новосибирске. У С. И. Шермана три внука, внучка, две правнучки и правнук.

Ученая степень кандидата геолого-минералогических наук присуждена С. И. Шерману в 1964 г. ученым советом Иркутского государственного университета за защиту диссертации «Тектоническая трещиноватость Слюдянского флогопитоносного поля (Прибайкалье)». Ученая степень доктора геолого-минералогических наук присуждена в 1977 г. за защиту диссертации «Разломная тектоника Байкальской рифтовой зоны (тектонофизический анализ)» ученым советом Института геологии и геофизики СО РАН (г. Новосибирск). Ученое звание профессора было присвоено С. И. Шерману Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки СССР в 1980 г. по представлению кафедры динамической геологии Иркутского политехнического института (ныне Иркутский национальный исследовательский технический университет).

С 1978 по 1999 г. С. И. Шерман состоял членом ученого совета по защитам докторских диссертаций при Институте геологии и геофизики СО РАН (г. Новосибирск), с 2009 по 2017 г. принимал активное участие в работе диссертационных советов при Иркутском национальном исследовательском техническом университете и Институте земной коры СО РАН.

Высокий уровень научных исследований принес С. И. Шерману всероссийскую и международную известность. Признанием его заслуг перед научным сообществом было избрание в 1992 г. членом-корреспондентом, а в 1995 г. – действительным членом Российской академии естественных наук. Он трижды избирался соросовским профессором. Долгие годы С. И. Шерман являлся членом Межведомственного тектонического комитета при Президиуме РАН, членом двух ученых советов по защитам докторских диссертаций.



В 1998 г. С. И. Шерману была присуждена премия Совета Министров СССР в области науки и техники, в 2004 г. присвоено звание «Заслуженный деятель науки Российской Федерации» и звание «Заслуженный деятель науки Республики Бурятия», в 2014 г. – звание «Почетный работник науки и техники Российской Федерации».

За многолетний добросовестный труд С. И. Шерман был награжден медалями «За строительство Байкало-Амурской магистрали», «Ветеран труда», «За доблестный труд», бронзовой медалью ВДНХ СССР, серебряной медалью Оргкомитета Международного геологического конгресса (Москва, 1984 г.), 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. В 2014 г. по решению ученого совета ИЗК СО РАН к 80-летию со дня рождения С. И. Шермана опубликована библиография его трудов.

С. И. Шерман скончался 13 июля 2017 г. Несмотря на тяжелую болезнь, до последнего дня жизни вел активную научно-организационную деятельность. Вместе с ученицей, кандидатом геолого-минералогических наук Е. А. Горбуновой, он подготовил к печати основополагающую статью по реологии среды в межблоковых сейсмоактивных зонах континентальной литосферы, неформально выполнял обязанности заместителя главного редактора международного электронного журнала «Геодинамика и тектонофизика», издающегося в ИЗК СО РАН с 2010 г., а также эксперта научно-технической сферы в рамках научного направления «Рациональное природопользование» при ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ Министерства образования и науки РФ.

### **Творческая и научно-организационная деятельность профессора С. И. Шермана**

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. Его перу (в соавторстве) принадлежат более 450 научных работ, включая 16 монографий; более 60 статей и две монографии, изданные за рубежом.

С. И. Шерманом впервые разработана реологическая модель разломов литосферы, установлены статистические зависимости между их основными параметрами, выявлены закономерности вертикальной и горизонтальной зональности деструкции литосферы, базирующиеся на изменении ее прочностных и реологических свойств с глубиной и по латерали. Сформулирован важный для геодинамики вывод об упруговязкой деформации и разрушении литосферы, соответствующих поведению тела Максвелла при формировании сети разломов. Этот сделанный в 70-х гг. прошлого столетия вывод лег в основу последующих коллективных

работ лаборатории тектонофизики, организованной С. И. Шерманом в 1979 г. в Институте земной коры СО РАН.

Одним из знаковых результатов научной деятельности С. И. Шермана стала трехтомная монография «Разломообразование в литосфере» (1991, 1992, 1994), в которой обобщены проведенные под его руководством в лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН широкомасштабные исследования процессов деструкции в литосфере. Количественный подход к изучению процессов разломообразования в литосфере в зависимости от типов напряженного состояния воплотился в трехтомнике как новая методология, применение которой в тектонофизической практике трудно переоценить. Она позволила создать комплекс геологических и экспериментальных методов, основанных на количественных приемах геодинамических исследований деструкции литосферы, и на их базе показать, что динамика развития разломов предопределяется типом напряженного состояния литосферы, влияющим на соотношения между параметрами тектонических нарушений, глубинами их проникновения и контролируемыми синхронно протекающими процессами.

С. И. Шерман и его ученики В. В. Ружич, Р. М. Лобацкая, С. А. Борняков, К. Ж. Семинский, В. Ю. Буддо, А. Н. Адамович, А. В. Черемных, О. В. Лунина, А. С. Гладков, Е. А. Горбунова и другие внесли в тектонофизику принципиально новые представления об областях динамического влияния разломов, которые широко используются в полевой геологии, сейсмологии, а также в практике инженерно-геологических изысканий, поисков и разведки рудных месторождений. С. И. Шерманом систематизированы известные и предложены новые критерии-комплексы подобия для определения условий проведения экспериментов и их согласования с природной ситуацией. Среди этих работ особую значимость приобрели экспериментальные исследования процессов разломообразования в упруговязкой и вязкоупругой среде литосферы. Экспериментальные работы были направлены на максимально возможное использование теории подобия и размерностей в экспериментах по разломообразованию в литосфере. Значительная часть исследований была сконцентрирована на поиске взаимосвязей процессов разломообразования и сейсмичности с использованием современных понятий и методов фрактального анализа, мезомеханики, а также представлений о зонах современной деструкции литосферы и их сегментной активизации. Была разработана методика количественной оценки короткопериодной (месяцы, годы, десятилетия) активизации разломов, позволившая выделить в продолжительном, геодинамически активном периоде развития разломов кратковременные сейсмические активизации. Этот путь открывает новые возможности в исследованиях весьма важной практической составляющей функции активных разломов, которая проявляется в отношении к сейсмичности, ее долгосрочному прогнозу с выходом на оценку сейсмической опасности.

С. И. Шерман уделял большое внимание поиску путей применения полученных результатов в геологической практике. Им были созданы и предложены для использования в геолого-разведочных работах методические приемы оценки параметров разрывных нарушений и прогноза расположения сети разломов на местности, а также методы создания региональных шкал сейсмической интенсивности. Одним из итогов его исследований, проведенных вместе со специалистами по сейсмостойкому строительству, стала региональная шкала сейсмической интенсивности, разработанная на примере территории Прибайкалья.

Исследования последних лет были сконцентрированы на выявлении закономерностей селективной активизации разломов в реальном времени и их сейсмичности. В этой области С. И. Шерманом предложены методы оценки количественных индексов сейсмической активности разломов, на основе которых изучены закономерности их пространственно-временной селективной активизации в сейсмических зонах литосферы. Установлена и математически обоснована тектонофизическая закономерность локализации очагов землетрясений в областях динамического влияния разломов, избирательно активизирующихся благодаря воздействию деформационных волн. Обобщение материалов по короткопериодным активизациям разломов и пространственно-временной локализации очагов землетрясений, стимулируемых в сейсмических зонах литосферы воздействием деформационных волн, явилось основой для разработки новой тектонофизической концепции сейсмического процесса и прогноза землетрясений, опубликованной в монографии «Сейсмический процесс и прогноз землетрясений: тектонофизическая концепция» (2014 г.).

В предложенной С. И. Шерманом тектонофизической концепции сейсмического процесса показано, что необходимо отделять сейсмические процессы в континентальной литосфере от тех, которые происходят в зонах сочленения континент – океан, т. е. в зонах субдукции литосферных плит. В континентальной литосфере следует разделять сильные землетрясения ( $7,5 \leq M < 8$ ) и сильнейшие ( $M \geq 8$ ), так как их подготовка осуществляется в специфических условиях напряженно-деформированного состояния. Сильнейшие землетрясения – исключительные явления в сейсмических зонах. Для их более глубокого понимания желательно сравнивать одну группу сейсмических событий с другой, выявляя характерные признаки и закономерности подготовки редкого сильного землетрясения. В последних публикациях С. И. Шерман предлагает искать причину появления сильнейшего сейсмического события, происходящего в области динамического влияния разлома, где фиксируются землетрясения с  $7,5 \leq M < 8$ , в специфике реологического поведения субстрата под нагрузкой. Такой подход вводит в физику очага землетрясения параметр вязкости, а в процесс его формирования и реализации – фактор времени,

что может оказаться существенным шагом на пути к реальному прогнозу сильнейших сейсмических событий ( $M \geq 8$ ) в континентальной литосфере.

Работа в области решения наиболее значимых практических проблем осуществлялась С. И. Шерманом и в рамках международного сотрудничества. Он являлся членом рабочей группы по составлению Карты активных разломов мира международной программы «Литосфера», как ответственный исполнитель принимал участие в совместных российско-китайских исследованиях по теме «Экспериментальное изучение стабильности земной коры и геологические катастрофы». С 1994 по 1998 г. по приглашению Института геологии Центра естественных наук и технологий Вьетнама (г. Ханой) руководил тематическими исследованиями по составлению Карты активных разломов территории Вьетнама. В 2012 и 2013 гг. был соруководителем и ответственным исполнителем крупного международного российско-китайского проекта РФФИ «Закономерности активизации разломов рифтовых систем Байкальской и Шаньси и признаки подготовки сильных землетрясений», в 2015–2016 гг. – руководителем российско-китайского проекта по конкурсу РФФИ «Исследование метанестабильных состояний разломов в сейсмоактивных зонах Китая и России как фундаментальной основы прогноза землетрясений: по результатам комплексного мониторинга экспериментальных моделей и природных объектов».

Отдавая должное результатам научной деятельности С. И. Шермана, необходимо отметить одну важную черту его личности – желание передать свои знания молодому поколению геологов. Десятки ученых-геологов и геологов-производственников называют С. И. Шермана своим учителем. В течение тридцати лет (1978–2009 гг.) он читал лекции на геолого-разведочном факультете Иркутского государственного технического университета. В ИЗК СО РАН С. И. Шерман активно готовил кадры высшей квалификации. Он являлся научным консультантом при подготовке пяти докторских диссертаций, у 18 кандидатов наук был научным руководителем.

Оценивая в целом вклад профессора С. И. Шермана в развитие Института земной коры СО РАН в течение 57 лет его научно-исследовательской и научно-организационной деятельности, важно отметить следующие главные моменты: 1) организация лаборатории тектонофизики (1979 г.) и руководство ею в течение более 25 лет; 2) глубокая разработка основной темы исследований лаборатории «Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы» с акцентом на сейсмичность; 3) активное участие в организации и систематическом издании в ИЗК СО РАН международного электронного журнала «Геодинамика и тектонофизика» (2010 г.); 4) эффективная подготовка кадров высшей квалификации.

*К. Ж. Семинский*

## **РАЗДЕЛ 1**

# **ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОННО-БЛОКОВОЙ И РАЗЛОМНО-БЛОКОВОЙ СТРУКТУРЫ ЛИТОСФЕРЫ. ЛИТОСФЕРНЫЕ ПЛИТЫ, ВНУТРИПЛИТНАЯ ИЕРАРХИЯ БЛОКОВ И ИХ КИНЕМАТИКА**

## **МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ ГИМАЛАЙСКО-ТИБЕТСКОГО ОРОГЕНА**

**Р. С. Алексеев, Ю. Л. Ребецкий**

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

Первые полномасштабные работы по созданию глобальных моделей эволюции литосферы Земли появились в 30-х гг. XX в. Чаще всего они являлись кинематическими и схематично отображали основные этапы. Первые модели для Гималайско-Тибетского орогена как уже отдельной структурной единицы появились в 80-е гг. В работе [Molnar, Tapponnier, 1975] представлены данные о главных тектонических структурах и основных разломах региона, данные о дрефте Индийского континента до начала коллизии (по результатам магнитных исследований). В исследовании предполагают, что начало движения Индийской плиты соотносится с периодом около 150 млн лет (этому периоду времени соответствует отделение Индии от Антарктики), далее около 110 млн лет плита дрейфовала в направлении север – северо-восток. Во время этого движения океаническая литосфера Индийской плиты субдуцирует, около 40 млн лет назад стадия субдукции переходит в стадию коллизии двух плит. В качестве механизма возникновения утолщенной коры под Тибетом рассматривается ситуация с действием Индийской плиты. В результате этого действия появляется утолщенная кора, из-за которой в свою очередь образуется литосферный корень. Формируется каплевидная структура, которая в какой-то момент отделяется. Эта модель является наиболее известной и по сей день. В более поздних работах появляются уточненные данные по временам различных этапов, так, например, в [Aitchison, Ali, Davis, 2007] закрытие океана Тетис оценивается в период 25–30 млн лет назад.

В данной работе представлен анализ существующих моделей эволюции литосферы Гималайско-Тибетского орогена с учетом новых данных, а также показана собственная модель эволюции орогена. Наша модель опирается, в частности, на данные реконструкции современного напряженного состояния, выполненной методом катакластического анализа (МКА) [Ребецкий, 2007]. Реконструкция напряженного состояния коры Гималайско-Тибетского орогена представлена в [Ребецкий, Алексеев, 2014]. Модель состоит из четырех основных этапов и описывает эволюцию литосферы Гималайско-Тибетского орогена начиная с периода отделения Индии от Антарктики до нынешнего момента.

#### **Литература**

- Aitchison J C., Ali J. R., Davis A. M. When and where did India and Asia collide? // J. Geophys. Res. 2007. 112:B05423.
- Molnar P., Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of continental collision // Science. 1975. Vol. 189. P. 419–426.
- Ребецкий Ю. Л. Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М.: Академкнига. 2007. 406 с.
- Ребецкий Ю. Л., Алексеев Р. С. Тектоническое поле современных напряжений Средней и Юго-Восточной Азии // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5, вып. 1. С. 257–290. URL: <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2014-5-1-0127>

## **СРАВНЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРЕХ КРУПНЫХ МЕГАБЛОКОВ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА**

**И. В. Бондарь, А. В. Маринин**

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия  
[bond@ifz.ru](mailto:bond@ifz.ru)

В работе рассматриваются три крупные структуры Кольского полуострова – Центрально-Кольский мегаблок, Беломорский пояс и расположенная между ними Имандра-Варзугская шовная зона. Для изучения напряженно-деформированного состояния применялись два тектонофизических метода по обработке собранных полевых данных. Метод катакластического анализа разрывных нарушений Ю. Л. Ребецкого позволяет определить количественные характеристики реконструируемых локальных стресс-состояний: положение осей главных напряжений/деформаций и коэффициент Лоде – Надаи. При анализе систем тектонической трещиноватости разных кинематических типов с их объединением в устойчивые структурные ассоциации (парагенезы) применен структурно-парагенетический метод Л. М. Расцветаева.

В пределах Центрально-Кольского мегаблока оси максимального сжатия имеют в основном субширотную ориентацию, лишь в некоторых точках наблюдения фиксируется северо-восточное и северо-западное направления. Оси максимального растяжения имеют субмеридиональные, северо-западные и гораздо меньше северо-восточные ориентировки. Промежуточная ось в большинстве случаев ориентирована вертикально, изредка в северо-западном направлении. В этом мегаблоке преобладают обстановки горизонтального сдвига, горизонтальное сжатие фиксируется гораздо реже, а горизонтальное растяжение зафиксировано лишь в одной точке наблюдения.

В пределах Беломорского пояса оси максимального сжатия имеют более хаотичный рисунок. Выделяется два максимума, скорее даже пояса – субширотный, ближе к северо-западному, и субмеридиональный, ближе к северо-восточному. Оси максимального растяжения более сгруппированы, в большинстве локальных стресс-состояний они ориентированы в запад-северо-западном направлении, в меньшем количестве – в северо-восточном направлении, редко вертикальны. Промежуточная ось также почти всегда вертикальна, изредка отклоняясь в северо-восточном направлении, субширотном и субмеридиональном. В Беломорском поясе также преобладают обстановки горизонтального сдвига, но фиксируется и большее количество горизонтального растяжения. Горизонтальное сжатие зафиксировано в одной точке наблюдения.

В пределах Имандра-Варзугской шовной зоны положение осей главных напряжений наиболее разнообразное. Оси максимального сжатия часто ориентированы субвертикально, фиксируются также северо-западные и северо-восточные ориентировки. Ось максимального растяжения ориентирована либо в северо-восточном направлении, либо в северо-западном. Промежуточная ось также часто субвертикальна. Обстановки горизонтального сдвига и горизонтального растяжения составляют примерно равное количество, а обстановки горизонтального сжатия крайне редки и встречаются ближе к границе с Центрально-Кольским блоком.

Можно сделать вывод, что в каждой отдельно взятой крупной тектонической структуре Кольского полуострова ориентировки главных осей напряжения отличаются. Очевидно, что на напряженно-деформированное состояние этих мегаблоков оказывают влияние окружающие их другие крупные структуры: Хибинский, Ловозерский, Ковдорский массивы, Кейвская и Печенгская структуры. На центральную часть Беломорского пояса существенное влияние оказывает Кандалакшский грабен. Однако, несмотря на это, во всех трех рассматриваемых структурах преобладают обстановки горизонтального сдвига и реже растяжения. Обстановки горизонтального сжатия фиксируются редко, что говорит об общей региональной геодинамической обстановке Кольского полуострова.

# **ПРИМЕНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ТРЕЩИНОВАТОСТИ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ ПОЛЕЙ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ ЗОНЫ МОРСКОГО РАЗЛОМА В ЗАПАДНОМ ПРИБАЙКАЛЬЕ)**

**Ю. П. Бурзунова**

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

Проведен комплексный анализ трещиноватости в горных породах зоны Морского разлома (Прибайкалье) с целью сравнения результатов двух принципиально различных методов реконструкции полей тектонических напряжений по геолого-структурным данным. В работе применялся новый подход к парагенетическому анализу статистических замеров «немых» трещин, позволяющий восстановить напряженное состояние локального объема горных пород и установить его принадлежность к зоне разлома определенного морфогенетического типа и ориентировки [Семинский, 2014, 2015]. Вторым способом реконструкции полей напряжений являлся кинематический метод, позволяющий рассчитать стресс-тензор и стресс-режим на основе анализа векторов смещений породных блоков по трещинам [Delvaux, 1993]. Для участка исследований с помощью двух методов получены решения о напряженном состоянии в разломных зонах локального и регионального уровней, разного морфогенетического типа и ориентировки. На локальном уровне парагенетический анализ выявил в два раза больше решений о поле напряжений при равном количестве пунктов наблюдений, что связано с различными условиями формирования трещинных сетей и штрихов скольжения – во времени (стадии развития разломной зоны) и пространстве (близость к сместителям разлома). Большинство локальных решений кинематического метода имеет идентичное среди парагенетических решений в этом же коренном выходе. Новых (не повторяющихся в другом методе) парагенетических решений на порядок больше, чем кинематических. На региональном уровне парагенетический анализ позволил реконструировать поля напряжений более крупного ранга (региональный), чем кинематический (трансрегиональный). Результаты обеих методик охватывают несколько этапов тектонического развития массива горных пород. Восстановленные разными методами идентичные поля напряжений, предположительно, относятся к одному этапу. Изученный фрагмент зоны Морского разлома по результатам обоих методов был активизирован в трех наиболее интенсивно выраженных обстановках – сжатие, левый сдвиг, растяжение. Сдвиговые напряжения сконцентрированы ближе к сместителю разлома. Кроме того, проявлены поля субмеридионального растяжения и северо-восточного сжатия. Результаты реконструкции полей



напряжений двумя методами сопоставимы и в целом успешно дополняют и частично подтверждают друг друга, при этом парагенетический метод дает более многочисленные и разнообразные решения, позволяющие выйти на региональный уровень, а также построить карту разломных зон участка. Рекомендуется комплексное применение парагенетического и кинематического методов.

#### **Литература**

Семинский К. Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 1: Теоретические основы и принципы // Геодинамика и тектонофизика, 2014. Т. 5, № 2. С. 445–467.

Семинский К. Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 2: Основные этапы и перспективы // Геодинамика и тектонофизика, 2015. Т. 6, № 1. С. 1–43.

Delvaux D. The TENSOR program for paleostress reconstruction: examples from the east African and the Baikal rift zones // Terra Nova. 1993. Vol. 5. P. 216.

## **ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕРРИГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НИЖНЕЙ – СРЕДНЕЙ ЮРЫ ПЛОЩАДИ ХАККУЛЬ ПО МАТЕРИАЛАМ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ**

**Р. Т. Гафуров, Р. А. Умурзаков**

Ташкентский государственный технический университет,  
г. Ташкент, Узбекистан  
gafurowrustam@bk.ru, umrah@mail.ru

Специфика устройства нефтегазоносных регионов, которыми в основном оказываются осадочные бассейны с мощной толщей мезозойско-кайнозойских отложений, требует детальных исследований по обнаружению структур – ловушек углеводородов. В этом отношении методы сейсморазведки, с современными техническими средствами производства наблюдений и обработки информации, на наш взгляд, занимают главенствующее положение. Проводится анализ существующих методических трудностей применения сейсморазведки при изучении отражающих границ нефтегазоносных горизонтов для определения наиболее оптимальных параметров наблюдений. На примере небольшой площади Хаккуль Бухаро-Хивинского нефтегазоносного региона (БХНГР) приводятся материалы различных этапов сейсморазведочных исследований. Наблюдался постепенный переход от простых методов сейсморазведки (МОВ) к более сложным (МОГТ-2D и 3D), которые позволили детализировать строение объекта, что невозможно было выявить по результатам предыдущих работ ввиду их малой разрешающей способности.

Проведен анализ методических параметров сейсморазведочных наблюдений различных этапов исследований и особенностей временных разрезов – выраженности и возможности корреляции в них опорных отражающих горизонтов (Т2 – кровля карбонатных отложений неокома-апта, Т6 – кровля карбонатных отложений оксфорда верхней юры, Т7 – кровля терригенных отложений нижней – средней юры), которые являются наиболее значимыми для поисковых работ. Отмечено, что наиболее уверенная корреляция отраженных волн была отмечена от XIII горизонта неокома-апта (Т2) и вблизи кровли келловей – оксфорда (Т6), менее уверенно от кровли терригенной юры (Т7). Отражающий горизонт (Т7), отождествляемый условно с поверхностью донорских образований, проявляется спорадически. По материалам сейсморазведки на временных разрезах они выделяются как многофазные «колебания». Наблюденные волны-помехи, характеризующиеся кажущимися скоростями 500–1800 м/с, видимыми частотами 20–40 Гц, свидетельствуют об отрицательном влиянии поверхностных сейсмогеологических условий и строения верхней части разреза на качество сейсмического материала. Интенсивность низкоскоростных помех снижается при удалении приемной расстановки от пункта взрыва, высокоскоростных – при применении группирования сейсмоприемников.

По результатам анализа сделан вывод, что наиболее рациональной при изучении ниже-среднеюрских и доюрских отложений в условиях площади Хаккуль является методика 2D- и более кратного профилирования 2D или трехмерная сейсморазведка 3D с применением 21 сейсмоприемника на базе 100 м и возбуждением упругих колебаний взрывами из скважин 15–35 м или сейсмовибрационным методом. При соответствующей технической оснащенности наиболее технологична сейсморазведка 3D, которая позволяет с достаточным разрешением, требуемой глубиной (кратностью) и высокой достоверностью решать не только задачи поискового, но и разведочного этапов. Хотя возможность изучения геологического разреза мезозойско-кайнозойских отложений определяется не только правильным выбором методики: условий приема и возбуждения, но и физическими свойствами горизонтов, к которым приурочены отражающие границы.

## СЛОИСТО-БЛОКОВОЕ СТРОЕНИЕ ОКЕАНИЧЕСКОЙ ЛИТОСФЕРЫ

Е. П. Дубинин

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,  
г. Москва, Россия  
edubinin08@rambler.ru

Вся океаническая кора Мирового океана, охватывающая около 2/3 твердой оболочки Земли, формируется в спрединговых хребтах, непрерывно протягивающихся через все океаны на расстояние более 65 тыс. км. На основании результатов морского бурения, драгирования, геофизической информации и исследования офиолитов к концу прошлого столетия сложилось представление, что океаническая кора имеет преимущественно слоистую, хорошо стратифицированную структуру и сложена лавами, щитовыми дайками, изотропным и полосчатым габбро и подстилается перидотитами литосферной мантии, отделенными от пород коры границей Мохоровичича. Толщина коры мало зависит от скорости спрединга и имеет средние значения 5–7 км. В настоящее время дискуссии о строении коры касаются преимущественно природы ее 3-го слоя, который в соответствии с предположениями Канна сложен габброидными породами, а согласно модели Хесса – серпентинизированными перидотитами. Такие вариации в строении коры определяются особенностями ее аккреции при разных скоростях спрединга, разной степени прогретости мантии, а также влиянием на процесс аккреции крупных трансформных разломов. В процессе эволюции океаническая кора и литосфера испытывают значительные воздействия тектонических и магматических процессов, интенсивность проявления которых связана с кинематическими перестройками границ плит, сопровождающимися отмиранием старых и появлением новых границ, которые оставляют свои следы в структурном плане и глубинном строении литосферы в виде шовных зон палеограниц плит. Современные границы плит (дивергентные, трансформные и конвергентные) представляют собой глубинные разломы, секущие всю литосферу. Они широко распространены и неплохо изучены. Известны их основные геолого-геофизические характеристики. Не менее широко в пределах океанической литосферы распространены и палеограницы плит. Они представляют собой линейно вытянутые асейсмичные структуры – шовные зоны, разделяющие разновозрастные литосферные блоки, ранее принадлежавшие разным плитам и, следовательно, имеющие, как правило, разное строение, возраст и историю развития. Зоны палеограниц плит отчетливо выделяются по геоморфологическим и геолого-геофизическим признакам на фоне прилегающих участков единой в настоящее время литосферной плиты. В соответствии с тремя

типами границ плит в пределах океанической литосферы можно выделить несколько типов палеодивергентных границ (зоны контакта океанической и континентальной литосферы в районах рифтогенных пассивных окраин, зоны контакта разновозрастных блоков литосферы, сформированные при перескоке и пропагейтинге оси спрединга, собственно отмершие спрединговые хребты), два типа палеотрансформных границ, связанных с пассивными следами трансформных разломов, разделяющими разновозрастные блоки литосферы и палеоконвергентные границы плит, связанные с зонами палеосубдукции. Каждый из этих типов имеет характерный набор геолого-геофизических признаков, позволяющих однозначно идентифицировать их в структуре современной океанической литосферы и реконструировать их эволюцию. В целом палеограницы разбивают всю океаническую литосферу, имеющую слоистое строение, на многочисленные гетерогенные блоки с корой разного возраста, нередко сформированной на разных спрединговых хребтах.

## **УПРУГИЕ СВОЙСТВА GEОCPEДЫ И OБPAЗOBAHИE BOЛHOBODOB ЗEMHOЙ KOPЫ**

**А. М. Кузин**

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва, Россия  
amkouzin@ya.ru

Горизонты инверсии упругих свойств существуют на всех глубинных уровнях континентальной и океанической коры в районах, имеющих разные геологическое строение и историю развития. Они могут отличаться характером распределения сейсмических свойств и, соответственно, упругодеформационными свойствами. В статье [Кузин, 2014] было выполнено обобщение по возможным механизмам образования волноводов (или горизонтов инверсии упругих свойств) в земной коре.

Кратко можно выделить следующие механизмы (библиография дана в [Кузин, 2011]): 1) границы перехода от одного типа разрушения к другому, обусловленные реологической расслоенностью консолидированной коры; 2) границы изменения напряженного состояния среды с микроразрушениями (трещинами и порами); 3) волны тектонических напряжений, возможно связанные с существованием общего ритма Солнечной системы; 4) зоны интерференции падающих и отраженных от поверхности Земли тектонических волн; 5) гидрогенно-химическое разуплотнение, вызванное экранированием вышележащей толщей водосодержащих пород при повышении температуры, приводящее к увеличению флюидного давления по принципу автоклавного эффекта и, соответственно,

реакцию дегидратации; 6) узлы пересечения плоскостей разрывных нарушений (ленточные по форме волноводы).

Очевидно, что в природе в образовании волноводов или горизонтов инверсии упругих свойств участвуют многие из перечисленных механизмов. Распространение волноводов в земной коре не повсеместно и разноглубинно. Это свидетельствует о том, что в разрезе должны существовать благоприятные условия по упругим свойствам для образования волноводов. Для анализа этих условий были использованы сейсмические разрезы ГСЗ [Булин, Егоркин, 2000], полученные в различных нефтегазоносных и рудных районах. Сейсмические разрезы фрагментов профилей ГСЗ были перестроены в разрезы скорости продольных волн ( $V_p$ ), разрезы отношения скорости продольной волны к скорости поперечной волны ( $V_p/V_s$ ). По разрезам  $V_p$  и  $V_p/V_s$  на качественном уровне проводилось осреднение относительного среднего значения на разрезе  $V_p/V_s$ , а на разрезе  $V_p$  еще и с учетом изменения скорости с глубиной.

В результате анализа выяснилось, что положение волноводов коррелируется с резким изменением эффективных значений  $V_p/V_s$  сейсмических горизонтов, находящихся выше и ниже волновода. Параметр  $V_p/V_s$ , как известно, функционально связан с коэффициентом Пуассона, существенное различие между значениями  $V_p/V_s$  контактирующих слоев создает условия для образования на контакте зоны высоких деформаций. Аномальные значения  $V_p/V_s$  в основном обусловлены флюидным фактором, что налагает дополнительные ограничения на условия образования волноводов.

#### **Литература**

Кузин А. М. Горизонты инверсии упругих свойств геологической среды в данных сейсмических наблюдений // Геофизические исследования. 2014. Т. 15, № 3. С. 71–82.

Кузин А. М. Пространственно-фазовая локализация месторождений углеводородов и отображение конвергентности процессов флюидизации в геологической среде по сейсмическим данным // Дегазация Земли и генезис нефтяных месторождений. К 100-летию со дня рождения П. Н. Кропоткина : сб. тр. М. : ГЕОС, 2011. С. 276–301.

Булин Н. К., Егоркин А. В. Региональный прогноз нефтегазоносности недр по глубинным сейсмическим критериям. М. : Центр ГЕОН, 2000. 194 с.

## **АКТИВИЗИРОВАННЫЕ КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ НА ТЕРРИТОРИИ ЮГО-ЗАПАДНОЙ БЕЛАРУСИ**

**Е. А. Кухарик, А. В. Матвеев**

Институт природопользования НАН Беларуси  
г. Минск, Республика Беларусь  
shzhk@mail.ru

Кольцевые структуры как особые геологические образования широко распространены на всех континентах в пределах древних платформ [Кольцевые структуры континентов ... , 1987; Кольцевые структуры Земли ... , 1989], в том числе и на территории запада Восточно-Европейского кратона. По результатам проведенных региональных исследований на территории юго-западной Беларуси установлена активизация ряда подобных структур на современном этапе [Матвеев, Кухарик, 2019]. Этот вывод базируется на анализе особенностей строения четвертичной толщи и расположения отдельных комплексов рельефа (дугообразные контуры долин рек, концентрическое расположение эоловых гряд и холмов и др.).

Всего в исследуемом регионе выявлено 20 концентрических форм различного диаметра [Кольцевые структуры территории ... , 1993], однако к активным на современном этапе могут быть отнесены только четыре кольцевые структуры. Наиболее крупные из них расположены в центральной части рассматриваемой территории (Бездежская и Детковичская кольцевые структуры), несколько меньшие параметры имеют Бельская и Переволокская концентрические формы. Названия кольцевых структур даны по [Там же].

Все выявленные кольцевые образования отчетливо обнаруживаются в строении рельефа земной поверхности. Так, Переволокская кольцевая структура выделена по особенностям расположения эоловых гряд и холмов в пределах заболоченной озерно-аллювиальной низины. Она имеет диаметр около 15 км. В северо-западной части кольцевая структура пересекается активным отрезком Выжевско-Минского суперрегионального разлома.

Бездежская кольцевая структура расположена северо-восточнее г. Дрогичина. Ее диаметр около 24 км. Северный контур подчеркивается дугообразным изгибом долины р. Ясельды, центральная и южная части заняты краевыми ледниковыми образованиями днепровского возраста (равнина Загородье) с интенсивным проявлением гляциодислокаций. Здесь установлено тройное сочленение активных локальных разломов.

По сходным критериям западнее г. Березы выделена активная Детковичская кольцевая структура. Она имеет форму полуовала с радиусом около 13 км, открытого к юго-западу. Контуры подчеркиваются изгибом

долины р. Ясельды, а также участками краевых ледниковых комплексов, осложненных гляциодислокациями. Расположенная южнее г. Кобрина Бельская кольцевая структура имеет диаметр около 11 км. Ее контуры окаймляются болотными массивами и эоловыми формами рельефа. На северо-западе и юге структуры выделены отрезки активных локальных разломов.

#### **Литература**

- Кольцевые структуры континентов Земли / В. Н. Брюханов [и др.]. М. : Недра, 1987. 185 с.
- Кольцевые структуры Земли: миф или реальность / Я. Г. Кац [и др.]. М., 1989. 190 с.
- Матвеев А. В., Кухарик Е. А. Современная геодинамика территории юго-западной Беларуси // Літасфера. 2019. № 2 (51). С. 36–44.
- Кольцевые структуры территории Беларуси / А. В. Матвеев и [др.] // Наука и техника. Минск, 1993. 82 с.

## **СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ДЕФОРМАЦИИ НА ПРИМЕРЕ МЕТАПЕСЧАНИКОВ ТАЛАССКОГО АЛАТАУ**

**А. В. Кушнарeva<sup>1</sup>, А. К. Худолей<sup>1</sup>,  
А. М. Пасенко<sup>2</sup>, Л. Ю. Крючкова<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет  
г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН  
г. Москва, Россия  
nastaskush@gmail.com

Определение деформационных характеристик региона является неотъемлемой частью структурных исследований. В данной работе сравниваются параметры эллипсоида деформации, полученные (1) двумерными методами стрейн-анализа, (2) трехмерным структурным анализом породы, (3) исследованиями свойств анизотропии магнитной восприимчивости (АМВ). Определение величин деформации проводилось для кварцевых металаевропесчаников узунахматской свиты Узунахматского блока, входящего в состав складчато-надвиговой структуры Таласского Алатау. Деформационному стилю региона отвечает запад-северо-западное направление оси растяжения и север-северо-восточная ось сжатия [Voytenko, Khudoley, 2012]. Методом [Fry, 1979] стрейн-анализа по микрофотографиям шлифов были определены параметры эллипсов деформации в трех взаимно перпендикулярных сечениях, по которым реконструировался конечный стрейн-эллипсоид. В качестве индикаторов деформации были выбраны объекты первоначально эллиптической формы – кварцевые зерна. Однако при оценке двумерной деформации и

дальнейшей экстраполяции нескольких сечений породы на весь объем не учитывается внутренняя неоднородность среды. Возможность изучения структурных особенностей во всем объеме образца предоставляет рентгеновское микротомографическое (МКТ) сканирование, проводившееся нами в РЦ СПбГУ «Рентгенодифракционные методы исследования». Для анализа трехмерных моделей использовалось программное обеспечение VLOB3D [Ketcham, 2005]. Структурный анализ включал в себя выделение обломочных зерен из матрикса породы, аппроксимацию зерен эллипсоидами и фиксирование соответствующих главных осей. Исследования характеристик АМВ производилось в ИФЗ РАН. АМВ зависит от преобладающей кристаллографической ориентировки зерен ферро- и парамагнитных минералов, их морфологии и состава. Связь магнитной анизотропии пород со структурно-текстурными особенностями позволяет применять ее для изучения структурных элементов деформированных пород [Borradaile, 1991]. Субгоризонтальная ось удлинения стрейн-эллипсоида была четко определена всеми перечисленными методами и ориентирована в запад-северо-западном направлении, вдоль шарниров складок. Наибольшее сходство величин осей наблюдается у эллипсоидов деформации, полученных методами Фрая и МКТ, эллипсоиды АМВ имеют некоторые отличия. Ввиду трудоемкости проведения количественной оценки деформации двумерными методами стрейн-анализа МКТ представляется объективной заменой данных методов, в то время как применение АМВ требует дальнейшего изучения.

*Исследование проводилось при поддержке гранта РФФИ № 20-05-00252.*

#### **Литература**

Voitenko V. N., Khudoley A. K. Structural evolution of metamorphic rocks in the Talas Alatau, Tien Shan, Central Asia: Implication for early stages of the Talas-Ferghana Fault evolution // *Comptes Rendus Geoscience*. 2012. Vol. 344, Is. 3–4) P. 138–148.

Fry N. Random point distribution and strain measurement in rocks // *Tectonophysics*. 1979. 60. P. 89–105

Ketcham R. A. Computational methods for quantitative analysis of three-dimensional features in geological specimens // *Geosphere*. 2005. Vol. 1. P. 32–41.

Borradaile G. J. Correlation of strain with anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) // *PAGEOPH*. 1991. Vol. 135, N 1. P. 15–29.



# **«ВНЕРАЗЛОМНЫЕ» ЗОНЫ ОБЪЕМНОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ ГОРНЫХ ПОРОД: ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИМЕРЫ И ВОЗМОЖНЫЕ ИНТЕРПРЕТАЦИИ**

**М. Г. Леонов**

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

В изучении разломов и сопутствующих им деформаций горных масс достигнуты впечатляющие успехи. Исследования охватывают весь спектр хрупкой деформации от внутрикристаллических микро-трещин до трансконтинентальных разломных зон, однако при этом – и в геологии, и в геомеханике – меньше внимания уделяется объемной деформации геологических тел, не связанной непосредственно с разломами или с зонами их влияния.

В докладе обращено внимание на рассмотрение пространственно ограниченных и относительно автономных объектов, которые обладают своей собственной инфраструктурой и не обнаруживают непосредственной связи с равными или превосходящими их по рангу разломными структурами. Во многих случаях стиль деформаций в пределах изученных объектов свидетельствует о 3D-подвижности (текучести) породных масс, а изменение внешней формы геологических тел происходит без нарушения сплошности ограничивающей их поверхности.

Рассмотрены конкретные геологические объекты, расположенные в различных регионах и сформировавшиеся в разных геодинамических обстановках: чехольные отложения палеопротерзойского проточехла Восточно-Европейской платформы, гляциокомплексы, палеозойские осадочные образования Тянь-Шаня, вовлеченные в плитно-орогенный тектогенез, гранитные массивы фундамента и пр.

Все изученные тела обладают гранулярно-блоковой инфраструктурой – исходной (первичной) или наведенной (вторичной). Породные комплексы с гранулярно-блоковой инфраструктурой характеризуются ослаблением или потерей внутренней связности и разрыхлением, что стимулирует проявление объемной подвижности (текучести) горных пород в твердом состоянии, т. е. их реидное поведение, в результате которого формируются своеобразные морфо- и инфраструктурные ансамбли.

Существует несколько механизмов, обеспечивающих объемную деформацию горных масс: пластическая деформация; хрупкая микросколовая (кливажная) деформация; хрупкая макросколовая (разломно-блоковая) деформация; динамическая рекристаллизация; брекчирование и катаклиз; меланжирование. Их действие – по отдельности или в определенном сочетании – приводит к дезинтеграции и нарушению сплошности первоначально единых объемов горных пород и к возникновению

их блочно-гранулярной кластической инфраструктуры. Возникновение дискретной структуры делает возможным внутреннее перераспределение вещества – их текучесть. Структурная переработка пород, изменение формы геологических тел и их позиции происходят при явной тенденции к механической дезинтеграции, потере связности, возникновению пустотного пространства, т. е. к разрыхлению. Подобный стиль поведения горных масс является фундаментальным явлением тектоники земной коры и показывает реальную возможность существования «внеразломных» зон и объемов дезинтегрированных породных масс.

*Работа выполнена по теме госзадания ФГБУН «ГИН РАН» при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 16-17-10059).*

## **РОЛЬ ПОДВИЖНЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ КАК ЭЛЕМЕНТОВ САМООРГАНИЗАЦИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ**

**А. Е. Лукьянов**

Институт горной геомеханики и геофизики –  
Межотраслевой научный центр ГЕОМЕХ  
г. Санкт-Петербург, Россия  
luk\_alex@inbox.ru

Характерным условием напряженно-деформированного состояния верхней части земной коры является преобладание горизонтальных тектонических напряжений. Наличие горизонтальных тектонических напряжений, значительно превосходящих геостатические напряжения от веса горных пород, отмечается по всему земному шару (Хаст, 1969 г.; Влох, 1994 г.) и, по всей видимости, является нормальным состоянием земной коры. В работе (Сашурин, 1995 г.) отмечается, что величина горизонтальных напряжений мало изменяется с глубиной.

В научном направлении «Гидрогеомеханика скальных массивов» [Тагильцев, 2001] на основании данного положения сделан вывод о формировании геодинамической этажности в верхней части земной коры. Геодинамическая этажность земной коры, в свою очередь, предопределяет возможность формирования тектонических нарушений с разной кинематикой смещения, пространственная ориентировка которых может быть описана при помощи типовой розы-диаграммы.

Практика геодинамических исследований и геолого-структурного анализа, опирающегося на фактические данные о положении тектонических нарушений в природных массивах скальных пород, показывает (Лукьянов, 2008 г.), что ориентировка и кинематика смещений по тектоническим разломам, как правило, хорошо согласуется с типовой розой-

диаграммой. Однако характерной особенностью, проявляющейся при построении роз-диаграмм на основании фактических данных, является задвигание всех типов кинематических структур (надвигов, сдвигов, сбросов), существующих в породном массиве.

Такое задвигание тектонических структур может быть объяснено постоянной сменой ориентировки главного нормального сжимающего напряжения, действующего в породном массиве, на характерный угол скола  $45-\varphi/2$ . Кроме того, анализ фактических данных позволяет предполагать, что оси главного, промежуточного и минимального нормальных напряжений в процессе деформаций породного массива, в результате сброса напряжений при смещении вдоль тектонических швов, периодически перескакивают на угол  $90^\circ$  и меняются ролями. Это создает предпосылки для разнонаправленного, в том числе колебательного, движения по тектоническим разломам.

Формирование двойного набора тектонических швов в природных скальных массивах обеспечивает построение эффективной системы шарниров, способствующих сбросу избыточных тектонических напряжений. Однако в силу своей природы избыточные тектонические напряжения никогда не могут быть нейтрализованы до конца и являются неизбывными. С этих позиций земная кора может рассматриваться как диссипативная структура, которая под воздействием непрерывного поступления энергии извне (в виде тектонических сил) демонстрирует организованное поведение. Формирование сложной системы шарниров, вдоль которых возможно непрерывное разнонаправленное смещение, способствующее рассеиванию энергии, непрерывно поступающей извне, является типичным примером самоорганизации, описанным в работах (Пригожин, Стенгерс, 1994 г.).

## **РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕНЗОРА СОВРЕМЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПАМИРА И ПРИЛЕГАЮЩХ ТЕРРИТОРИЙ ПО GPS-ДАННЫМ В СРАВНЕНИИ С СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИМИ ДЕФОРМАЦИЯМИ**

**А. Н. Мансуров**

Научная станция РАН в г. Бишкеке, г. Бишкек, Кыргызстан  
sur98gdirc@gmail.com

На основе данных GPS-наблюдений за 2007–2011 гг. в Таджикистане, 1998–2012 гг. в Китайском Памире и 1998–2012 гг. в Южном Тянь-Шане рассчитано распределение значений тензора деформации земной коры в горизонтальной плоскости. Математическая модель основана на расчете тензора градиента скорости движения GPS-пунктов

[Shen, Jackson, Ge, 1996]. Расчет проводился двумя методами: 1) в узлах сетки с шагом 22 км по широте и долготе на основе скоростей всех GPS-пунктов с понижением весов данных пунктов по мере удаления их от узла сетки (distance decaying constant) [Shen, Jackson, Ge, 1996; Мансуров, 2017]; 2) по отдельным наборам GPS-пунктов, окружающих участки земной поверхности округлой формы [Мансуров, 2015].

Распределение типа и интенсивности деформаций земной поверхности исследуемого региона крайне неоднородно. В зоне сопряжения Памира и Тянь-Шаня наблюдается сильное горизонтальное укорочение, меняющееся от направленного по азимуту  $-45^\circ$  (северо-запад – юго-восток) в западной части до субмеридионально направленного с элементами транспрессии в восточной части. Южная половина Памира испытывает субширотное удлинение, незначительное в центральной части и значительно большее на западном и восточном флангах. Лежащая к западу от Памира Таджикская депрессия, напротив, демонстрирует существенное субширотное укорочение. Зона сопряжения Таджикской депрессии с лежащим к северу от нее Гиссарским хребтом Тянь-Шаня испытывает праводвиговые деформации, предположительно приуроченные к Южно-Гиссарскому праводвиговому разлому.

Проведен сравнительный анализ полученного по GPS-данным распределения деформаций земной поверхности с полученным по данным фокальных механизмов землетрясений [Юнга, 1999] распределением сейсмотектонических деформаций. Направление горизонтальных компонент тензора обобщенно-плоских сейсмотектонических деформаций в целом совпадает с направлением деформаций по GPS-данным, но интенсивность в отдельных областях может значительно отличаться.

#### **Литература**

Shen Z. -K., Jackson D. D., Ge B. X. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements // Journal of Geophysical Research. 1996. Vol. 101. P. 27957–27980. URL: <http://scec.ess.ucla.edu/~zshen/publ/96JB02544.pdf>

Мансуров А. Н. Распределение скорости современной деформации земной коры северного Тянь-Шаня, полученное триангуляцией сети точек GPS-наблюдений // Современная тектонофизика: методы и результаты : материалы Четвертой молодежной тектонофизической школы-семинара. 5-9 окт. 2015 г. М. : ИФЗ, 2015. Т. 1. С. 192-201.

Мансуров А. Н. Непрерывная модель распределения современных деформаций Памиро-Тяньшаньского региона по данным GPS-наблюдений // Геология и геофизика. 2017. Т. 58, № 7. С. 986–1005. URL: <https://doi.org/10.15372/GiG20170703>

Юнга С. Л. Сравнительный анализ сейсмотектонических деформаций в областях активных геодинамических режимов. Геофизика на рубеже веков. М. : ИФЗ РАН, 1999. С. 253–264.

## ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ПО СТРОЕНИЮ ПОКРОВНО-НАДВИГОВЫХ НАРУШЕНИЙ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО КАВКАЗА

А. В. Маринин<sup>1</sup>, Т. Ю. Тверитинова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова  
г. Москва, Россия

marinin@ifz.ru, tvertat@yandex.ru

Большой вклад в общий структурный рисунок Северо-Западного Кавказа вносят разрывные системы, среди которых в первую очередь следует упомянуть разного масштаба сдвиговые и взбросо-надвиговые нарушения. В разные годы в зависимости от господствующих взглядов для формирования тектонической структуры большее или меньшее значение придавалось взбросовым и надвиговым разрывам. Самые известные и хорошо видимые на карте крупные взбросо-надвиги и покровы расположены вдоль южного крыла складчатого сооружения Северо-Западного Кавказа: Бекишейский, Краснополянский, Воронцовский, Джанхотский, Наужинский, Пластунский и Чемитокваджинский. Большинство из них косо ориентированы к осевой зоне Северо-Западного Кавказа, образуя характерную региональную трансpressивную структуру.

Для реконструкции напряженно-деформированного состояния в зонах покровно-надвиговых структур региона изучены мелкие складки, небольшие разрывы, зеркала скольжения, отрывы, сколовые трещины, стресс-стилолиты и другие малые структуры – индикаторы тектонических деформаций массива горных пород. Для анализа малых структурных форм использовался структурно-парагенетический метод [Расцветаев, 1987], для обработки полученных данных по зеркалам скольжения – метод катакластического анализа [Ребецкий, 2007].

Взбросовые и надвиговые дислокации в районе Воронцовского покрова и Пластунского надвига имеют ЗСЗ простирание с падением плоскости сместителя на ССВ. Установлено, что и в аллохтонной, и автохтонной частях надвигов оси максимального сжатия ( $\sigma_3$ ) направлены в ССВ направлении, а оси минимальных и промежуточных сжимающих напряжений ( $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ ) ориентированы в ЗСЗ направлении или субвертикально. Взбросовые и надвиговые смещения вблизи Бекишейского разлома имеют запад-северо-западное простирание и падение на север-северо-восток. Данные проведенной реконструкции подтверждают установленный Ч. Б. Борукаевым структурный парагенез правого сдвига меридиональной ориентировки Туапсинской зоны и взбросо-надвигов Бекишейско-Наужинской системы нарушений северо-западного простирания. Мы фиксируем здесь сочетание обстановок северо-восточного сжатия и горизонтального сдвига с формированием правых и левых сдвигов

(соответственно субмеридионального и субширотного простирания), а также обстановок меридионального сжатия и горизонтального сдвига с формированием преимущественно правых сдвигов северо-западного простирания. В зоне Джанхотского надвига преобладают взбросовые и надвиговые структуры субширотного простирания. Оси максимального сжатия характеризуются в целом меридиональным направлением. Оси максимального растяжения в южной части зоны надвига субвертикальны, а в северной субвертикальны или имеют субширотное положение. В зонах всех перечисленных покровно-надвиговых нарушений присутствуют субгоризонтальные отрывные структуры, а зафиксированные здесь мелкие разрывные нарушения связаны с обстановкой ССВ или меридионального сжатия с формированием как взбросо-надвиговых, так и сдвиговых структур. Сходен и тип напряженного состояния – преобладают обстановки горизонтального сжатия и горизонтального сдвига.

Выявленные особенности напряженно-деформированного состояния всех рассмотренных нарушений четко свидетельствуют об их надвиговой кинематике. В районах региональных покровно-надвиговых нарушений заметно преобладают обстановки горизонтального сжатия и горизонтального сжатия со сдвигом. При этом для северных висячих крыльев надвигов фиксируются также обстановки горизонтального растяжения со сдвигом.

#### **Литература**

Расцветаев Л. М. Парагенетический метод структурного анализа дизъюнктивных тектонических нарушений. Проблемы структурной геологии и физики тектонических процессов. М. : ГИН АН СССР, 1987. Ч. 2. С. 173–235.

Ребецкий Ю. Л. Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М. : Наука, 2007. 406 с.

## **МНОГОМЕРНЫЙ СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛИТОСФЕРЫ БАЙКАЛО-МОНГОЛЬСКОГО РЕГИОНА**

**А. И. Мирошниченко, К. Г. Леви, В. А. Саньков,  
А. В. Лухнев, О. Ф. Лухнева**

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

Целью настоящего исследования являлось изучение особенностей и источников формирования неотектонических структур части Монголо-Сибирского региона (90–115° в. д. и 43–52° с. ш.) по результатам изучения корреляционных взаимосвязей и геодинамического районирования, основанного на многомерном статистическом анализе числовых массивов, описывающих геолого-геофизические и геолого-геоморфологические природные процессы.

Для описания особенностей проявления эндо- и экзогеодинамических процессов в литосфере данного региона был использован набор геолого-геофизических параметров.

Эндогеодинамические процессы оценивались по параметрам разломной тектоники, сейсмичности, скоростей современных горизонтальных деформаций земной коры. В анализ включены вариации толщины литосферы и земной коры, плотность глубинного теплового потока, величины гравитационных аномалий и ряда других.

В качестве характеристики экзогеодинамических процессов выбрана толщина экзогенно-активного слоя, включающая в себя все пространство земной поверхности, заключенное между вершинной и базисной поверхностями, и являющаяся показателем степени расчлененности рельефа.

Использование иерархического метода кластерного анализа позволило разделить все изучаемые геолого-геофизические параметры на три основные группы. Первая объединяет величины сейсмического момента и плотности активных разломов, а также скорости современных горизонтальных деформаций и величины глубинного теплового потока. Вторая группа представлена толщинами земной коры и экзогенно-активного слоя и скоростями современных горизонтальных движений. К этому же кластеру относится величина амплитуд вертикальных неотектонических движений. Третья группа составлена двумя параметрами литосферы – величинами гравитационных аномалий и толщины литосферы.

Пространственное группирование параметров изучалось посредством применения кластерного анализа (метод  $k$ -средних). Всего выделено семь классов, отличие которых друг от друга статистически обосновано. Пространственное положение и состав кластеров определяются историей развития, геологическим строением территории, геодинамическими особенностями ее развития и скоростями современных деформаций.

Часть из выделенных кластеров характеризуют крупные жесткие и квазижесткие блоки литосферы, ряд кластеров описывают крупные системы активных разломов, проявленных на данной территории. Остальные кластеры являются условно переходными между описанными двумя группами. По подобию соотношения средних величин соответствующих геолого-геофизических параметров в определенных кластерах вся территория исследований разделяется на два блока – западный и восточный.

Поиск латентных причин (факторов), вносящих наибольший вклад в дисперсию данных, производился на основе метода главных компонент, позволяющего минимизировать число факторов. В результате расчетов выделено четыре основных фактора, проявленных в областях, отличающихся особенностями строения и источниками формирования неотектонических структур:

– фактор I. Области формирования поднятий и впадин, связанного с повышенными значениями горизонтальных деформаций сжатия и растяжения соответственно;

– фактор II. Области с выраженным динамическим влиянием мантийных аномалий, выразившимся в формировании массивных поднятий и сводообразовании;

– фактор III. Области активного разломообразования и сейсмичности, связанные с активизацией утоненной литосферы в пределах границ литосферных плит и крупных блоков;

– фактор IV. Области с высоким уровнем активного сдвигового деформирования земной коры.

Результаты изучения корреляционных взаимосвязей и многомерно-го статистического анализа геолого-геофизических данных позволили осуществить геодинамическое районирование территории Монголо-Сибирского региона, выделить главные факторы формирования неотектонических структур и оценить области и результаты взаимодействия этих факторов между собой.

## **СОВРЕМЕННЫЕ ДЕФОРМАЦИИ НА УЛАН-БАТОРСКОМ ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ ПО ДАННЫМ GPS-ГЕОДЕЗИИ**

**А. И. Мирошниченко<sup>1</sup>, Н. А. Радзиминович<sup>1</sup>, А. В. Лухнев<sup>1</sup>,  
Ф. Л. Зуев<sup>1</sup>, С. Дэмбэрэл<sup>2</sup>, Д. Эрдэнэзул<sup>2</sup>, М. Улзийбат<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Институт астрономии и геофизики АНМ, г. Улан-Батор, Монголия  
mai@crust.irk.ru, ulzibat@iagac.mn

В рамках международного сотрудничества Исследовательского центра астрономии и геофизики АНМ (Монголия) и Института земной коры СО РАН (Россия) в окрестностях Улан-Батора в 2010 г. был создан GPS-полигон Ulaanbaatar. В его составе, в пределах сейсмогенерирующей структуры Эмелт, была организована локальная сеть GPS-пунктов Emeelt.

Структура полигонов и количество GPS-пунктов определялись, исходя из расположения и ориентации активных разломов, геолого-геоморфологического строения территории, проявления палео- и современной сейсмичности. По данным измерений за период 2010–2017 гг., на 18 GPS-пунктах, расположенных в пределах двух локальных GPS-полигонов Центральной Монголии, проведен анализ параметров современных горизонтальных деформаций земной коры.



Установлено, что в системе ITRF2014 GPS-пункты полигонов смещаются на восток-юго-восток со скоростями 25–30 мм/год, азимут смещения в среднем составляет 105°. Относительно Евразии векторы для большинства пунктов несколько развернуты к югу, но также движутся на ЮВ по азимуту 130–150° со скоростью 2–4 мм/год.

Наблюдается уменьшение скоростей горизонтальных движений в пределах полигона Ulaanbaatar с северо-запада на юго-восток. Неоднородность распределения скоростей в пределах исследуемой территории предопределяет зональное строение поля относительных горизонтальных деформаций.

Западная часть полигона характеризуется преобладающим растяжением в субширотном направлении, величина удлинения составляет  $\varepsilon_1 = (12-16) \cdot 10^{-8} \text{ год}^{-1}$ . В восточной части полигона наблюдаются деформации укорочения в направлении СЗ-ЮВ со значениями  $\varepsilon_2 = 22,4 \cdot 10^{-8} \text{ год}^{-1}$ . Наиболее высокие значения максимальных сдвиговых деформаций  $\varepsilon_{\text{max}} = (10-14) \cdot 10^{-8} \text{ год}^{-1}$  образуют протяженную область в центре полигона, вытянутую в северо-восточном направлении согласно с простираем основных геологических структур.

Для деформаций полигона Emeelt, расположенного в пределах сейсмогенерирующей структуры Эмелт, характерно удлинение земной коры в ЮВ-СЗ направлении и несколько меньшее по величине укорочение в ЮЗ-СВ румбах. Величина скорости удлинения достигает  $5 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$ . Максимальными деформациями характеризуется осевая часть разлома, пересекающего полигон в СЗ направлении.

Анализ результатов обработки измерений на GPS-пунктах геодинамических полигонов позволяет констатировать, что параметры современных горизонтальных деформаций на исследуемой территории определяются суммарным воздействием общих геодинамических особенностей ее развития, геологического строения региона и пространственным положением активных разломов.

# **РАЗЛОМНАЯ ТЕКТНИКА СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО КАВКАЗА И ЗАПАДНОГО ПРЕДКАВКАЗЬЯ: СТРУКТУРНЫЕ ПОСТРОЕНИЯ И НАТУРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ**

**И. В. Попков**

Кубанский государственный университет, г. Краснодар, Россия  
geoskubsu@mail.ru

Для получения объективной информации о разломной тектонике региона была построена серия сбалансированных разрезов, пересекающих вкрест основные структурно-тектонические элементы исследуемой территории. При их построении привлекался весь комплекс геолого-геофизических материалов, выполнены натурные наблюдения в обнажениях Северо-Западного Кавказа, что позволило получить достаточно надежную информацию о морфологических и кинематических особенностях дизъюнктивно-пликативных дислокаций [Попков, 2006; Попков, Попков, Дементьева, 2011; Попков, Попков, 2014; Попков, Попков, 2015].

Определяющим типом дислокаций в рассматриваемом регионе являются складчато-надвиговые структуры. Надвиги имеют четко выраженное листрическое строение, т. е. они имеют крутые, иногда близвертикальные плоскости сместителей во фронтальной части, быстро выходящие с глубиной с переходом в субгоризонтальные срывы. Соответственно с направлением падения плоскости надвигов происходит смещение в плане и сводов полуантиклиналей. При этом они могут расформировываться с образованием моноклинално залегающих блоков, зажатых между соседними надвигами. То есть здесь мы наблюдаем достаточно универсальную закономерность в строении такого типа структур, обусловленную механизмом их формирования под воздействием сил бокового сжатия, а именно: трансформацию горизонтальных тектонических движений в вертикальные в фронтальных частях чешуй с образованием характерных складчато-надвиговых дислокаций. Во фронтальных частях надвигов отмечаются высокоамплитудные линейные антиклинали с крутыми асимметричными, иногда подвернутыми крыльями, а также максимальные амплитуды вертикального смещения по разрывам и наиболее высокий стратиграфический диапазон их проникновения. По мере движения от лобовой части чешуйчатого надвига в обе стороны амплитуда вертикального смещения по разрыву заметно уменьшается с появлением сдвиговой составляющей.

Тангенциальные напряжения передаются со стороны складчато-орогенных сооружений Кавказа в пределы прилегающей Скифской платформы, приводящих к образованию в ее чехле резонансных дислокаций бокового сжатия [Попков, Попков, 2015].

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и администрации Краснодарского края (проект 19-45-230005 p\_a).*

#### **Литература**

Попков В. И. Чешуйчато-надвиговое строение Северо-Западного Кавказа // Доклады АН. 2006. Т. 411, № 2. С. 835–841.

Попков В. И., Попков И. В., Дементьева И. Е. Новый региональный нефтегазоперспективный объект Скифской плиты // Геология, география и глобальная энергия. 2011. № 2 (41). С. 111–115.

Попков В. И., Попков И. В. Возможные типы ловушек УВ в складчато-орогенных зонах (на примере Северо-Западного Кавказа) // Геология, география и глобальная энергия. 2014. № 3 (58). С. 9–18.

Попков В. И., Попков И. В. Изучение малых структурных форм – ключ к пониманию возможных типов ловушек нефти и газа в пределах Северо-Западного Кавказа // Геология. Известия Отделения наук о Земле и природных ресурсов Академия наук Республики Башкортостан. 2015. № 21. С. 23–27.

### **АКТИВНЫЕ РАЗЛОМЫ ЮЖНО-БАЙКАЛЬСКОЙ ВПАДИНЫ ПО СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ**

**Н. А. Радзиминович<sup>1</sup>, Ц. А. Тубанов<sup>2,3</sup>, Д. П.-Д. Санжиева<sup>2</sup>,  
А. И. Мирошниченко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

<sup>3</sup> Бурятский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Улан-Удэ, Россия  
nradzim@crust.irk.ru, geos@gin.bscnet.ru, siren65@mail.ru

Генетическая связь разломов и сейсмичности указывает на возможность и необходимость использования результатов сейсмологических исследований при изучении процессов разломообразования. Особенно это касается активных разломов, скрытых под водами озер и осадками рифтовых впадин. Объектом такого рода исследований нами выбрана Южно-Байкальская впадина, которая является крупнейшей и древнейшей впадиной в Байкальской рифтовой системе и характеризуется высокой сейсмической активностью. Кроме того, этот район наилучшим образом обеспечен системой регистрации землетрясений, будучи окруженным станциями Байкальского и Бурятского филиалов ФИЦ ЕГС РАН. В ходе работы были проанализированы распределение эпицентров, данные о глубинах очагов и фокальных механизмах, проведено сопоставление эпицентральных зон с имеющимися картами разломов. Следует отметить, что карты разломов для впадины составлялись в том числе и на основании карт эпицентров, поэтому при анализе в расчет принимались также батиметрические данные.

При выделении эпицентральных зон наблюдается их согласованность с простираемостью структур впадины. Поперечные зоны выделяются менее однозначно, по протяженности они гораздо короче основных. Для южной части впадины характерны протяженные линейные зоны, а в пределах центральной части конфигурация эпицентрального поля усложняется. Для протяженных зон характерна сегментация или дискретность. Наряду с относительно четко локализованными зонами с концентрированной сейсмичностью выделяются области с рассеянным характером распределения эпицентров. Это территория впадины к юго-западу от дельты Селенги, зона Приморского разлома и Малое Море. Также выделяется несколько сейсмических брешей, представляющих собой, по-видимому, блоки, ограниченные сейсмоактивными разломами.

Распределение очагов землетрясений по глубине свидетельствует об активности разломов планарного типа. Построенные разрезы для релокализованных событий, произошедших вдоль южного и восточного бортов, показывают падение разломов под борт впадины, что можно интерпретировать как активность внутривпадинных разломов, а не бортового восточного разлома. На активность внутривпадинных разломов указывает также Южнобайкальское землетрясение, вызванное сбросовой подвижкой по крутопадающему на СЗ разлому.

Из-за малого количества данных о глубинах очагов и небольшом диапазоне сейсмоактивного слоя невозможно сказать об изменении углов падения нодальных плоскостей с глубиной. Анализ кинематического типа смещений по разрывам подтверждает доминирование сбросов по плоскостям СВ простираемости с углами падения  $30\text{--}70^\circ$ . Выявленные в очагах сдвиговые подвижки на западном замыкании впадины ожидаемы вследствие левосдвиговой компоненты смещений по Главному Саянскому разлому и западному отрезку Обручевского разлома; но в очагах землетрясений вблизи восточного борта Центрального Байкала сдвиговая компонента смещений отмечается по плоскостям, ориентированным несогласно с известными разломами.

В целом стабильность эпицентрального поля в течение инструментального периода наблюдений позволяет выделить сейсмоактивные структуры. Однако для более полной характеристики геометрии этих структур требуется улучшение точности локализации гипоцентров.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-05-00357а.*

# **ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРИРОДНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В РАЗНЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ОБСТАНОВКАХ: КОНТИНЕНТАЛЬНЫЕ ОРОГЕНЫ, ЗОНЫ СУБДУКЦИИ И СПРЕДИНГА**

**Ю. Л. Ребецкий**

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

Анализ результатов реконструкции напряжений для океанической литосферы в зонах спрединга и для активных континентальных окраин, выполненный в последние годы методом катакластического анализа (МКА) механизмов очагов землетрясений, позволяет выделить следующие закономерности [Ребецкий, 2020].

Зоны океанского спрединга (ЗОС) характеризуются ориентацией напряжений максимального горизонтального сжатия, как правило, почти параллельной их простиранию. Имеются также отдельные участки зон спрединга, где оси этих напряжений ориентированы косо (углы порядка 20–30°). Исключение из этого правила составляет арктическая зона спрединга. Здесь оси максимального горизонтального сжатия на нескольких участках вблизи полюса почти ортогональны простиранию оси хребта. ЗОС практически никогда не представлены единым геодинамическим режимом и сочетают на разных участках напряженное состояние горизонтального растяжения или горизонтального сдвига.

Наиболее протяженные трансформные зоны, как правило, представлены геодинамическими режимами горизонтального сдвига, хотя в них на отдельных участках могут наблюдаться режимы горизонтального растяжения и даже сжатия. Здесь оси максимального горизонтального сжатия составляют с простиранием зоны углы, близкие к 45°.

Зоны субдукции (ЗС), развивающиеся под островные дуги, имеют однотипное строение вдоль своего простирания и сложное — вкрест простирания. Наиболее стандартным является геодинамический режим горизонтального сжатия в коре островной дуги и континентальном склоне с направлением оси максимального горизонтального сжатия ортогонально простиранию дуги. В литосфере океанского склона сразу за тальвегом желоба наблюдается режим горизонтального растяжения с ориентацией оси минимального сжатия также вкрест простирания островной дуги. Есть ЗС с еще более сложным строением, когда области горизонтального растяжения с обеих сторон ограничивают осевую зону горизонтального сжатия. Они представлены горизонтальным сжатием в центральной части островной дуги и режимом горизонтального растяжения по краям дуги. ЗС в активных континентальных окраинах харак-

теризуются переходом вкрест их простирания от режима горизонтального растяжения в океанской плите до желоба к состоянию горизонтального сжатия в континентальном склоне. В коре континентального (субконтинентального) склона зон субдукции поддвигаемые касательные напряжения строго упорядочены и ориентированы от океана к континенту.

Зоны континентальных коллизий, сопровождающиеся горными поднятиями, наиболее часто представлены геодинамическим режимом горизонтального сжатия, а иногда режимом горизонтального сдвига в тех случаях, когда морфология горных поднятий отвечает хребтам. В этом случае оси максимального сжатия всегда субгоризонтальны и ориентированы ортогонально простиранию хребтов. В коре крупных межгорных и передовых прогибов в большинстве случаев напряженное состояние отвечает ориентации оси минимального сжатия в субгоризонтальном направлении – режимы горизонтального растяжения и сдвига. В коре внутригорных впадин, вовлеченных в поднятия, напряженное состояние отвечает ориентации оси промежуточного главного напряжения в субвертикальном направлении – режим горизонтального сдвига. В коре крупных по площади и высоких горных плато ориентация осей минимального сжатия субгоризонтальна (горизонтальное растяжение и сдвиг).

В докладе также будут представлены данные о величинах напряжений, полученные на основе МКА как для ЗС, так и для внутриконтинентальных орогенов. Они показали, что уровень девиаторных напряжений и прочность в коре орогенов в 3–4 раза больше, чем в коре ЗС. Большое влияние на уровень тектонических напряжений оказывает флюидное давление в трещинно-поровом пространстве пород.

#### **Литература**

Ребецкий Ю. Л. Поле глобальных коровых напряжений Земли // Геотектоника. 2020. № 6. С. 3–24.

## **ПОЛЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ТЕРРИТОРИИ МОНГОЛИИ В ПОЗДНЕМ КАЙНОЗОЕ**

**В. А. Саньков, А. В. Парфеев**

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

Проведены исследования напряженно-деформированного состояния земной коры территории Монголии с использованием данных о тектонической трещиноватости и смещениях по разрывам в зонах разломов, активных в кайнозое. Для расчетов стресс-тензоров тектонических палеонапряжений использовались программные комплексы TENSOR [Delvaux, 1993] и WinTENSOR [Delvaux, 2012]. Составлены база данных

и карта кайнозойского поля напряжений, проведено районирование территории по типу палеонапряженного состояния земной коры [Sankov, Parfeevets, 2020]. В целом ориентация осей максимального горизонтального сжатия  $S_{Hmax}$  позднекайнозойского и современного этапов варьирует от субмеридиональной, преобладающей на западе Монголии, до СВ и ВСВ, преобладающей на востоке. На юге территории преобладают условия транспрессии и сжатия, при продвижении к северу они сменяются на условия сдвига и транстенсии. Вдоль зон крупнейших зон широтных сдвигов Монголии – Северо-Хангайского и Долиноозерского наблюдается закономерное изменение напряженного состояния и парагенезов разрывных и складчатых структур, что связано с левосторонней сдвиговой кинематикой дизъюнктивов. Проведено сопоставление сделанных реконструкций с результатами расчетов современного напряженного состояния земной коры с использованием данных о механизмах очагов землетрясений, а также с результатами расчетов горизонтальных деформаций по данным спутниковой геодезии [Опасные геологические ... , 2017]. Сопоставление палео- и современного напряженно-деформированного состояния земной коры позволяет сделать заключение об эволюции поля тектонических напряжений в позднем кайнозое. История деформирования земной коры Монголии в кайнозое включает эпизоды, когда преобладали воздействия от различных источников тектонических сил или их сочетания. В начале кайнозоя основным фактором формирования тектонических структур являлось взаимодействие в юго-восточной части Азии и Тихоокеанской плиты, проявившееся в юго-восточной части территории. Растяжение земной коры, обусловленное течением астеносферы в ЮВ направлении, инициировало формирование структур Байкальской рифтовой системы. С плиоцена оно взаимодействует с ССВ сжатием литосферы, обусловленным процессом конвергенции Индостана и Евразии. Результатом этого взаимодействия являются сдвиговые движения по крупным разломам, транспрессивное горообразование. Формирование на этом фоне крупных сводовых поднятий Хангая и Хэнтэя обусловлено динамическим воздействием мантийных аномалий.

#### **Литература**

Delvaux D. The TENSOR Programm for Reconstruction: Examples from East African and the Baikal Rift Systems. Terra Nova 5. 1993. Abstr. Suppl. 1. 216.

Delvaux D., 2012. Release of Program Win-Tensor 4. 0 for Tectonic Stress Inversion: Statistical Expression of Stress Parameters. Geophysical Research Abstracts 14, EGU2012–5899.

Sankov V. A., Parfeevets A. V. The Cenozoic crustal stress state of Mongolia according to geological and structural data (review) // Geodynamics & Tectonophysics, 2020. Vol. 11, N 4. P. 722–742.

Опасные геологические процессы и прогнозирование чрезвычайных ситуаций природного характера на территории Центральной Монголии / отв. ред. Д. П. Гладкочуб. Иркутск : ИГУ, 2017. 331 с.

# УСТАНОВЛЕНИЕ ЗОНЫ ДИНАМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ ПАМБАК-СЕВАНСКОГО РАЗЛОМА (РЕСПУБЛИКА АРМЕНИЯ) ПО СТРУКТУРНО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИМ ПРИЗНАКАМ И СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ

**Р. С. Саргсян, К. С. Казарян**

Институт геофизики и инженерной сейсмологии  
им. А. Назарова НАН РА, г. Гюмри, Республика Армения  
rudolf-sargsyan@mail.ru

Статья посвящена изучению зоны динамического влияния северо-западного сегмента Памбак-Севанского разлома. В работе авторами была поставлена задача оценки зоны динамического влияния Памбак-Севанского разлома, точнее его северо-западной части. На первом этапе производилась оценка ширины зоны динамического влияния Памбак-Севанского разлома путем структурно-геоморфологического анализа местности с целью выявления геоморфологических признаков воздействия разлома на окружающую местность. Суть данного метода, который детально приводится в работе [Ребецкий, Сим, Маринин, 2017], основывается на выделении морфологических элементов рельефа – сколов и трещин, непосредственно указывающих на динамическое воздействие разлома. Исследования показали, что самой широкой частью исследуемого сегмента разлома является центральная, где ширина зоны составляет примерно 25 км и постепенно понижается к западу и востоку, соответственно в Амасийской части достигая 15 км, а у города Ванадзор примерно 18 км. Отметим также, что из-за густого расчленения территории рядом разломов, говоря о ширине зоны влияния Памбак-Севанского разлома, необходимо также иметь в виду, что периферийная ее часть является также зоной взаимодействия Памбак-Севанского разлома с другими разломами, например: Дзорагет-Амасийским разломом с севера, Ахурянским разломом с запада, Дебедским – с востока и рядом разломов антикавказского простираения с юга. С помощью анализа сколов и трещин была оценена общая трещиноватость местности, значения которой колеблются в пределах 0,2–0,42 км/кв. км.

Второй этап исследования был направлен на изучение современной сейсмической активности исследуемой части Памбак-Севанского разлома путем анализа пространственного распределения эпицентров и фокальных механизмов землетрясений. Исходя из соображений о структуре крупных разломных зон, представленных в работе [Жочарян, 2016], следует предположить, что механизмы очагов землетрясений, произошедших непосредственно в зоне динамического влияния исследуемого разлома, не должны кардинально отличаться друг от друга, тем самым указывая на сходный характер происходящих там сейсмических событий,



что в свою очередь должно быть обусловлено определенным напряженно-деформированным состоянием земной коры. Результаты исследования показали, что распределение эпицентров землетрясений разной величины в зоне Памбак-Севанского разлома имеет соответствующую согласованность со степенью трещиноватости местности. Исследование фокальных механизмов подтверждает результаты структурно-геоморфологической оценки зоны динамического влияния Памбак-Севанского разлома. В этой общей системе разломов преобладает взбросово-сдвиговый тип подвижек [Казарян, Бурмин, Аветисян, 2020], а в узлах пересечения с антикавказскими разломами встречаются также сбросовые подвижки. Основная часть землетрясений, произошедших здесь за период 1962–2019 гг., приходится именно на участки, где степень трещиноватости высокая. Более того, очаги двух землетрясений с  $M > 5$  (это собственно Спитакское разрушительное землетрясение 1988 г. с  $M = 6,9-7,1$  и еще одно землетрясение с  $M = 5,5$ , произошедшее в 1978 г.) приурочены к аномальным зонам наивысшей трещиноватости.

#### **Литература**

Ребецкий Ю. Л., Сим Л. А., Маринин А. В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методики и алгоритмы. М. : ГЕОС, 2017. С. 143–148.

Кочарян Г. Г. Геомеханика разломов. М. : ГЕОС, 2016. 424 с.

Казарян К. С., Бурмин В. Ю., Аветисян А. М. Параметры плоскостей разрывов Спитакской очаговой зоны по осредненным механизмам афтершоков землетрясения // Геофизические процессы и биосфера. 2020. Т. 19, № 1. С. 15–22.

## **НЕОТЕКТОНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ГРАНИЦА МЕЖДУ АМУРСКОЙ И ОХОТСКОЙ МИКРОПЛИТАМИ НА ПОЛУОСТРОВЕ ШМИДТА (ОСТРОВ САХАЛИН)**

**Л. А. Сим, А. В. Маринин**

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

В зоне конвергенции Евразийской и Северо-Американской крупнейших литосферных плит выделяются микроплиты, в частности Амурская и Охотская. Граница между этими микроплитами проводится по Западно-Сахалинскому разлому (Татарский пролив), далее она идет по Северному Сахалину и проходит через п-ов Шмидта (Savostin et al., 1983; Seno, 1985). На п-ове Шмидта комплексом структурных и тектонофизических методов проведена реконструкция неотектонических напряжений, для чего потребовалось ранжирование неотектонических напряжений и разломов. К I рангу отнесены Лонгрийский, Хейтонский, Тунинский разломы в пределах п-ова Шмидта, входящие в состав крупнейшей Северо-Сахалинской сдвиговой зоны (Рождественский, 1982).

Во II ранг включены многочисленные различного простирания разломы, длина которых не превышает 25 км. Вдоль разломов I, II рангов восстановлены сдвиговые неотектонические напряжения структурно-геоморфологическим (СГ) методом (Сим, 1991; Ребецкий и др., 2017). Разломы обоих рангов активизированы при субмеридиональной ориентации оси сжатия за исключением восточной части, где ось сжатия ССВ и СВ простирания. В центральной и северной частях полуострова многие разломы активизированы или формируются в обстановке трансенсии. На западном (Пильский разрез) и восточном (Хейтонский разрез) побережьях п-ова Шмидта произведено изучение тектонических напряжений – локальных стресс-состояний (ЛСС) полевыми методами: структурно-парагенетическим (Расцветаев, 1987) и методом катакластического анализа (Ребецкий и др., 2017); здесь восстановлены неотектонические напряжения III ранга.

В Пильском разрезе реконструировано 18, в Хейтонском – 21 ЛСС, по которым методом нахождения общих полей напряжений по данным о локальных тектонических напряжениях определены «региональные» поля напряжений (Сим, 1982). Для обоих разрезов уверенно определены сдвиговые типы напряженного состояния, но при этом по ориентации субгоризонтальных осей сжатия и растяжения оба разреза резко различны: Пильский разрез характеризуется СЗ простиранием оси сжатия и СВ – оси растяжения, на Хейтонском разрезе ось сжатия ССЗ простирания, а ось растяжения ориентирована в ВСВ направлении. В обоих разрезах определены общие тектонические напряжения – в Пильском разрезе это взбросовое поле при постоянной оси сжатия, а в Хейтонском – сбросовое при практически неизменной ориентации оси растяжения. Особенности тектонических напряжений Хейтонского разреза обусловлены развитием впадины Дерюгина, постоянная ось растяжения в двух общих полях напряжений здесь нормальна западному борту впадины, а в обнажениях зафиксированы дилатансионные структуры. На неотектоническом этапе п-ов Шмидта отличается чрезвычайной мобильностью, о чем свидетельствует переиндексация осей растяжения (Пильский разрез) и оси сжатия (Хейтонский разрез) с промежуточной осью при малом количестве ЛСС в каждом разрезе. Так, для Южного и южной части Северного Сахалина ранее уверенно по 56 определениям ЛСС восстановлено единое общее поле напряжений с широтной ориентировкой оси сжатия и меридиональной – растяжения (Сим и др., 2017), показавшее, что граница между Амурской и Охотской микроплитами не проходит по Центрально-Сахалинскому разлому. Резкое различие общих полей напряжений на западе и востоке п-ова Шмидта связано с прохождением по полуострову границы между Амурской и Охотской микроплитами. Она проходит по Хейтонскому и, предположительно, по расположенному западнее него Паромай-Эхабинскому разломам.

# СЕЙСМОПЛОТНОСТНЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ И ИЗОСТАЗИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ ВОСТОЧНОЙ ОКРАИНЫ СИБИРСКОГО КРАТОНА (ОПОРНЫЙ ПРОФИЛЬ 3-ДВ)

**В. Д. Суворов, Е. В. Павлов, Е. А. Мельник**

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

Вдоль опорного профиля 3-ДВ получены исключительно детальные для региональных исследований данные о строении земной коры и верхов мантии малоизученной геофизикой северо-восточной части Сибири [Государственная сеть ... , 2016]. Нами рассмотрен участок профиля, пересекающий восточную часть Сибирской платформы и ее пассивную континентальную окраину [Соколов, 2010; Pafenov, 1991]. Использованы сейсмические данные КМПВ, дающие сведения о верхней части коры, и ГСЗ для всей ее толщи. Моделирование производилось итеративным методом прямого лучевого трассирования [Zelt, 1999], гравитационное – по программе [Кочнев, Гоз, Поляков, 2008].

В верхней коре выделены крупные Приверхоянский передовой и трехслойный Тыловой прогибы, разделенные Сетте-Дабанской тектонической зоной с аномально повышенной до 6,5–6,6 км/с скоростью. В обоих прогибах выделяются два структурных этажа с изменяющейся по латерали мощностью от полного выклинивания до 10 км. В верхнем из них скорость изменяется от 3,3 до 5,8 км/с, в нижнем она повышена до 5,9–6,2 км/с.

Кора, дополнительно к верхней ее части, представлена еще тремя слоями. Нижний – мощностью 10–12 км со скоростью 6,7–6,9 км/с – наблюдается в кратонной части. В области пассивной окраины скорость в нем уменьшается до 6,6–6,7 км/с. Промежуточный слой примерно такой же мощности характеризуется скоростью 6,5–6,6 км/с под кратоном и 6,3–6,4 км/с под его окраиной. Мохо под кратоном залегает на глубине около 40 км, образуя прогиб под Сетте-Дабанской зоной до глубины около 50 км, ограниченный ступенью с уменьшением глубины 40–42 км. При этом скорость в верхах мантии постепенно уменьшается от 8,2–8,3 до 8,1 км/с в платформенной части и в складчатой области она оценивается в 7,9 км/с. Эту ступень можно принять за положение нижней границы кратона вдоль вероятного разлома с углом падения около 15°.

Сглаженные рельеф и аномалии Буге характеризуются уверенно линейным трендом, который свидетельствует о практически полной изостатической уравновешенности земной коры. Остаточные аномалии Буге использованы при оценке изменений плотности. При этом максимальные аномалии веса (вертикального напряжения) колонок

единичной площади до 230 МПа достигаются в средней коре и уменьшаются до (-30)–(+8) МПа на Мохо. Представляет интерес использование величины  $Vp^2\rho = K + \{4/3\}\mu$  в качестве априорных оценок прочности земной коры при геомеханическом моделировании.

#### Литература

Государственная сеть опорных геолого-геофизических профилей, параметрических и сверхглубоких скважин – основа глубинного 3D картографирования территории Российской Федерации и ее континентального шельфа / С. Н. Кашубин, Е. Д. Мильштейн, И. Ю. Винокуров, Ю. М. Эринчек, Р. Б. Сержантов, В. Ю. Татаринов // Региональная геология и металлогения. 2016. № 67. С. 43–48.

Кочнев В. А., Гоз И. В., Поляков В. С. Технология расчета плотностной скоростной модели и статических поправок по гравиметрическим данным // Геофизика. 2008. № 4. С. 28–33.

Соколов С. Д. Очерки тектоники северо-востока Азии // Геотектоника. 2010. № 6. С. 60–78.

Parfenov L. M. Tectonics of the Verkhoyansk-Kolyma Mesozoides in the context of plate tectonics // Tectonophysics. 1991. N 199. P. 319–342.

Zelt C. A. Modelling strategies and model assessment for wide-angle seismic traveltime data // Geophysical Journal International. 1999. N 139. P. 183–204.

## АЛЬПИЙСКИЕ ДИЗЬЮНКТИВЫ РАЗНОВОЗРАСТНЫХ СТРУКТУРНО-ВЕЩЕСТВЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ

**Т. Ю. Тверитинова**

Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия  
tvertat@yandex.ru

Дизьюнктивы обычно рассматриваются как разрывы сплошности геологической среды, т. е. как хрупкие деформации. Более широкий взгляд предполагает понимание дизьюнктивов как особых градиентных зон – зон концентрации деформаций различного типа [Ажгирей, 1966; Лукьянов, 1991; Расцветаев, 1987], лишь предельным выражением которых являются разрывы в полном понимании этого слова. В земной коре дизьюнктивы образуют сложные, находящиеся в иерархической взаимосвязи системы. Дизьюнктивы любого размера имеют сложное внутреннее строение, определяемое наличием в них структур более мелких. Дизьюнктивы характеризуются временем существования – они при определенных условиях возникают в породных массивах разного состава, происхождения и возраста, развиваются и в конце концов заживают (пропадают).

Формирование дизьюнктивов – проявление максимальных деформаций на пике проявления тектонических стрессов. Ослабление стрессов приводит к ослаблению процесса разрывообразования. Тектоническая

активизация возрождает процесс деформирования и формирования в том числе и дизъюнктивных структур, но при уже имеющейся структуре повторно деформируемых массивов новые дизъюнктивы часто развиваются по старым исходно существующим системам.

При составлении геологических карт геологическому картированию подлежат главным образом крупные дизъюнктивные нарушения со смещениями, а малые дизъюнктивы – трещиноватость – обычно остаются за бортом, тогда как именно они имеют важнейшее значение, определяя проницаемость породных массивов и, как следствие, распределение полезных ископаемых. Особым направлением в тектонике является изучение активных разломов. Но опять за бортом остается трещиноватость, тогда как именно она может определять масштабные хрупко-пластические активные деформации.

Из сказанного следует, что в современной структуре земной коры большую роль играют повсеместно развитые малые дизъюнктивные нарушения (трещиноватость), изучению которых не уделяется достаточного внимания, хотя общий эффект их развития может быть очень существенным. Кроме того, система малых и больших дизъюнктивов – это единая неразрывно связанная система состояния геологической среды, и без изучения малых дизъюнктивов общая деформационная картина будет далеко не полной.

Трещиноватость можно изучать в приповерхностной зоне литифицированных пород, для которой характерно развитие приоткрытых трещин. Распределение трещиноватости зависит от состава и структурно-текстурных особенностей массивов. В свою очередь появление трещиноватости приводит к структурированию массива. Кроме того, не стоит забывать о проблеме возраста структур. Возраст осадочных пород – это время литификации, для метаморфических – метаморфизма, для магматических – кристаллизации или застывания. Формирование породных массивов с самого начала сопровождается формированием внутренней структуры массива в виде неоднородностей, в том числе и первичных трещин. То есть формирование дизъюнктивов в породных массивах – это не только тектонический процесс. Есть первичные и вторичные (собственно тектонические) трещины. Возраст первичных трещин практически соответствует возрасту пород. Возраст вторичных трещин соответствует времени проявления тектонических процессов. Формирование тектонических трещин – одна из сторон сложного процесса преобразования породных массивов в условиях сжатия, растяжения, сдвига, более сложных деформаций.

На примере некоторых объектов Кавказа и Восточного Саяна рассмотрены особенности распределения альпийской трещиноватости в разновозрастных комплексах пород.

## **Литература**

Ажгирей Г. Д. Структурная геология. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1966. 493 с.

Лукьянов А. В. Пластические деформации и тектоническое течение в литосфере. М. : Наука, 1991. 144 с.

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.

## **О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ РАЗРЫВНЫХ И СКЛАДЧАТЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ДОЛИНЫ МАЧАЙДАРЬИ (БАЙСУНТАУ, ЮГО-ЗАПАДНЫЕ ОТРОГИ ГИССАРА)**

**Р. А. Умурзаков<sup>1</sup>, Ж. У. Дононов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Ташкентский государственный технический университет  
г. Ташкент, Узбекистан

<sup>2</sup> Каршинский инженерно-экономический институт, г. Карши, Узбекистан  
umrah@mail.ru, jasurdononov@mail.ru

Исследуемая часть долины реки Мачай (Мачайдарья, «дарья» в переводе с узбекского «река») расположена в северо-западной части Байсунтау, одного из основных горных поднятий юго-западных отрогов Гиссарского хребта Тянь-Шаня. По юго-западным отрогам Гиссара имеется большое число опубликованных работ, посвященных различным аспектам геологического строения, тектоники и геодинамики.

Мачайдарья протекает вдоль северо-западных склонов Байсунского хребта, поворачиваясь к югу, пересекает его под небольшим углом, образуя каньонообразные эрозионные врезы в юрских отложениях. Обнаженность последних дает возможность детального изучения готового природного разреза, в котором отчетливо проявляются следы дизъюнктивных нарушений различной природы. Северная часть описываемой территории – правобережье Мачайдарьи и долина ее притока Тангисар – сложена меловыми отложениями нижнего и среднего отделов. Здесь проявляется юго-западная периклиналильная часть относительно небольшого Айнабулакского антиклинального поднятия северо-восточной ориентировки. Рельеф этого, как, впрочем, и других участков, сильно расчлененный, в формировании его немаловажную роль сыграли поперечные и продольные разрывы различной природы и протяженности.

В средней части долины Мачайдарьи отчетливо проявляет себя крупная взбросо-надвиговая дислокация. Приводится детальное описание отдельных участков этой дислокации с изучением кинематики по трещинным структурам, с картированием разрывных нарушений различных порядков. В пределах урочища Тангисар взбросовая зона рассекает толщу юрских карбонатных отложений. По обе стороны зоны раз-

рыва сильно различаются падения пластов. Здесь и по другим участкам были собраны материалы для реконструкции полей напряжений и деформаций методами, основанными на кинематических данных по поверхностям скольжения, статистических данных замеров трещиноватости, а также других данных, свидетельствующих об особенностях деформации массивов горных пород. Детально обследованы отдельные участки проявления взбросовых, надвиговых, сдвиговых, сбросовых нарушений и их сочетания: на участке Хужамайхона, Чарбог, Капчигай, Ялгизбулак.

Предварительный анализ геологических материалов позволяет без сомнения определить преобладание элементов структуры, формирование которых связано со сжимающими усилиями. Поле напряжений, полученное по сводным данным массовых замеров трещин всего исследуемого района, характеризуется ориентацией оси главного нормального напряжения сжатия в восточном и западном секторах стереографической диаграммы. На участке Капчигай (южная часть территории, за пределами ущелья Дарбанд) ориентировка оси напряжения сжатия близгоризонтальная, тяготеет к северо-восточному и юго-западному румбам. Ось растяжения и промежуточная имеют наклонное положение. В пределах Хужамайхона (в средней части территории) отмечено проявление двух типов поля напряжений. Первое характеризуется как сдвиговое и взбросо-сдвиговое; второе имеет субгоризонтальную ось растяжения при наклонном положении двух других осей. Очевидна связь с ними обнаженных здесь крупных поверхностей сдвигов и сбросо-сдвигов. Они запечатлены на фотографических снимках, которые будут продемонстрированы во время доклада.

## **СКЛАДЧАТАЯ СТРУКТУРА БОЛЬШОГО КАВКАЗА, ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ЕГО ФОРМИРОВАНИЯ И ИСТОРИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ПО КРУПНЫМ РАЗЛОМАМ**

**Ф. Л. Яковлев, Е. С. Горбатов**

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

Были собраны данные по структуре и истории развития ряда регионов Большого Кавказа (БК) для объектов типа «структурная ячейка», имеющих размер около 5–7 км вкрест простирания. Эти данные включали в себя: 1) глубину кровли фундамента для стадии 1, конца осадконакопления; 2) величину сокращения для стадии 2, после формирования складчатости; 3) глубину кровли фундамента для стадии 2; 4) глубину кровли фундамента для стадии 3, современной, после горообразования;

5) амплитуду неотектонического поднятия и размыва; 6) разницу глубин кровли фундамента между стадиями 3 и 1. Первоначально материал был получен по 24 детальным структурным профилям общей длиной около 500 км в регионах Северо-Западного Кавказа (СЗК), Чиаурской зоны (ЧиЗ) и Юго-Восточного Кавказа (ЮВК); это сформировало массив данных для 78 «ячеек». Перечисленные параметры, очевидно, имеют прямое отношение к геодинамическим процессам формирования структуры Большого Кавказа, что позволяет решать обратные задачи по диагностике этих процессов. Для массива данных 78 ячеек были рассчитаны парные корреляции, для некоторых выявились очень сильные связи – например, для параметров 2 и 5 корреляция составила  $R = 0,82$ . Для уточнения всех сложных связей параметров был использован факторный анализ [Яковлев, Горбатов, 2018], который показал наличие двух факторов, отражающих, предположительно, природные процессы. Фактор  $F1$ , названный «Изостазия», имел вес 46,6 %, а нагрузки на параметры 1–6 составили 0,790; –0,195; 0,665; 0,982; 0,005; 0,853. Он показал зависимость глубины кровли фундамента для стадии 3, современной (4), от значения этого параметра на стадии 1 (1), что явно связано с изостазией и необходимо указывает на увеличение плотности пород коры (и деградацию ее мощности) в процессе эволюции структуры всего БК. Фактор  $F2$  «Сокращение» имел вес 40,2 %; нагрузки составили 0,022; 0,938; –0,736; –0,158; 0,957; –0,219. Здесь амплитуда поднятия (5) зависит от величины сокращения (2), что также может быть связано с изостазией и уменьшением плотности пород коры и мантии в процессе роста гор. Такие изменения плотности пород могут достигать 15 %.

К указанному массиву позже были добавлены результаты восстановления структуры складчатости в Дагестане (ДЗ) для 25 ячеек. Это позволило провести наблюдения над устойчивостью полученного результата. Было выявлено, что два процесса хорошо проявлены в СЗК; слабее, но проявлены для ЧиЗ и ЮВК. Но процессы не были выявлены для ДЗ отдельно и в комбинации ДЗ + ЧиЗ + ЮВК. Это говорит о реальности действия указанных двух процессов в центральной полосе складчатой деформации БК.

Анализ изменения мощностей слоев литосферы в условиях сохранения изостазии в процессе эволюции структуры тектонических зон БК показал, что природу смещений по субвертикальным разломам на границах блоков коры можно связывать с изменениями плотности пород коры и мантии (на 15 %), которые выявлены факторным анализом.

Сделано предположение, что изменения плотности пород коры и мантии в крупных блоках могут приводить к таким преобразованиям поля напряжений и таким структурным следствиям, которые могут ошибочно восприниматься как внешнее воздействие на них.



## Литература

Яковлев Ф. Л., Горбатов Е. С. Об использовании факторного анализа для исследования геодинамических процессов формирования Большого Кавказа // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9, № 3. С. 909–926.

## TWO TYPES OF THE LITHOSPHERE DESTRUCTION IN CENTRAL ASIA

**Yu. G. Gatinsky, T. V. Prokhorova**

Institute of Earthquake Prediction Theory  
and Mathematical Geophysics RAS, Moscow, Russia  
gatinsky@gmail.com, tatprokh@mitp.ru

Central Asia belongs to intracontinental regions with the most intensive increasing the crust and the whole lithosphere. But at the same time processes of the lithosphere destruction play also an important part within this region [Sherman, 2012]. Among them two main types can be distinguished. The first type the clearest manifests itself in the zone of the Pacific Slab subduction under the North China Craton. The subducting slab induces upwelling from the hydrous mantle transition zone, produces mantle convection and erodes the bottom of the overriding lithosphere mantle. Consequently, lithospheric thinning or even destruction occurs, sometimes with downward dripping of lithospheric components into the asthenosphere [Liu, Li, 2018]. Attached to the flat subduction of oceanic slab dehydration reactions from it would significantly hydrate the lithospheric mantle and decrease its rheological strength. These processes take place within Central Asia on a large scale since the analysis of P- and S-waves tomography shown the quasi-horizontal continuation of the Pacific Slab on about 2000 km to the West from the Japanese Trench at the depth 500–600 km maintaining approximately the same indicators of  $dV_p$  and  $dV_s$  as in subduction zone, but without hypocenters [Chen et al., 2016]. On the Earth surface above the slab heat flow reach values of  $100 \mu\text{w}/\text{m}^2$  and more [The global heat flow ... , 2011], accompanied by development of Late Cenozoic intracontinental volcanism, rift basins and Cenozoic depressions [Gatinsky et al., 2020]. Late Cenozoic magmatism in North Mongolia (East Hangay) is inferred to be produced firstly in slab-derived sources connected with the Pacific Slab continuation at a depth under East and Central Asia [Rasskasov et al., 2008].

Another type of the lithosphere especially its upper part destruction may be observed in SE Tibet, for which experimental GPS vectors confirm steady clockwise rotation ([http://itrf.ign.fr/ITRF\\_solutions/2014/](http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2014/)). Apparently, only the upper part of the crust participates in this rotation, because the results of seismic and magnetotelluric sounding according to the INDEPTH Program

establish in the crust of Central and Eastern Tibet layers of increased electrical conductivity at depths of 20–45 km, presumably corresponding to partial melting of rocks [Hu et al., 2012]. Hot and plastic upper – middle crust of SE Tibet on the border with the cold and hard lithosphere of Tarim and SE China breaks from the mantle and lower-crust substrate and moves at a speed of 20–30 mm/year on SE around the Eastern Syntax of the Himalayas under the pressure of the Hindustan Indenter, as confirmed by GPS data. Thus, the stress field at the border of the Tibet blocks with the SE China Block is controlled jointly by the compression from the Indian Plate to the NE or NNE and by the movement to the SE the material of the middle and upper crust of the Tibetan Plateau, which is squeezed along major slips with destruction of the upper part of the Tibet lithosphere.

### References

- Sherman S. I., Destruction of the lithosphere: Fault-block divisibility and its tectonophysical regularities. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2012, vol. 3 (4), pp. 315–344. <http://doi.org/10.5800/GT-2012-3-4-0077>
- Liu, M., Li, Z. Dynamics of thinning and destruction of the continental cratonic lithosphere: Numerical modeling. *Sci. China Earth Sci.* 61, 823–852 (2018). <https://doi.org/10.1007/s811430-017-9184-x>
- Chen Ch., Zhao D., Tian Y. et al. Mantle transition zone, stagnant slab and interpolate volcanism in Northeast Asia. *Geophysical Journal International*. Scholarone Manuscripts, 2016.
- The Global Heat Flow Database. *International Heat Flow Commission*. University of North Dakota. 2011. Available at: <http://www.heatflow.und.edu>
- Gatinsky Yu. G., Prokhorova T. V., Rundquist D. V. Central Asian geodynamic regimes west and east 102–104° geodivider. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2020, vol. 11, no. 2, pp. 334–351. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-2-0478>(in Russian)
- Rasskazov S. V. et al., Slab-derived and above-slab Late Cenozoic melts from convergent boundary zones of Asia and East Hangay, Central Mongolia // *Science on the Earth*, 2008, vol. 1(1), pp. 129–149. (in Russian)
- Hu J. et al. Lithospheric structure and crust – mantle decoupling in the southeast edge of the Tibetan Plateau. *Gondwana Research*, 2012, vol. 22, no. 3–4, pp. 1060–1067. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.01.003>

## РАЗДЕЛ 2

# СТРУКТУРА КРУПНЫХ РАЗЛОМНЫХ ЗОН ЛИТОСФЕРЫ. АКТИВНЫЕ РАЗЛОМЫ И КОНТРОЛЬ СИНХРОННЫХ И СОПУТСТВУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ

## НОВЫЕ ДАННЫЕ О ВОЗРАСТЕ ТЕРРАС ОСТРОВА БОЛЬШОЙ УШКАНИЙ (ОЗЕРО БАЙКАЛ)

С. Г. Аржанников<sup>1</sup>, Р. Броше<sup>2</sup>, А. В. Аржанникова<sup>1</sup>, А. В. Иванов<sup>1</sup>,  
Е. И. Демонтерова<sup>1</sup>, Д. Бурле<sup>2</sup>, Д. Янсон<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Aix Marseille University, Aix en Provence, France

<sup>3</sup> Institute of Geophysics, Czech Academy of Sciences, Prague, Czechia  
sarzhan@crust.irk.ru

Комплексные геолого-геоморфологические исследования, проведенные на острове Большой Ушканий (оз. Байкал), позволили уточнить данные по количеству террас, их строению и возрасту [Lake Baikal ... , 2021]. Тезисно излагая основные результаты, можно констатировать следующее:

1. В результате топографического профилирования выделены восемь террас на западной и семь террас на восточной оконечностях острова. Разница в высотах террас на различных берегах связана с интенсивными сбросовыми тектоническими движениями (южный и восточный берега острова) и гравитационными смещениями (оползни и обвалы зафиксированы на склонах по всем сторонам света в надводной части и на южном склоне в подводной части острова).

2. Наличие кварцевой гальки на абсолютной высоте 662–671 м свидетельствует о том, что максимальный уровень воды, зафиксированный на острове Большой Ушканий, составлял +215 м относительно современного уровня воды в озере.

3. Получены новые данные (радиоуглеродные АМС даты погребенных почвенных горизонтов озерным галечником пятой и четвертой террас и <sup>10</sup>Be возраст отложений первой и восьмой террас), свидетельствующие о существенном колебании уровня воды озера Байкал в позднем плейстоцене.

4. Анализ геологических разрезов и возраста осадочной толщи террасового комплекса говорит об образовании восьмой, седьмой и шестой террас в среднем плейстоцене и в начале позднего плейстоцена – в период, когда сток из оз. Байкал происходил через долину р. Иркут (650–670 м) [Catastrophic events ... , 2018]. Формирование с 1-й по 5-ю террасу происходило при уменьшении высоты порога стока на 100–120 м (образование нового стока через долину р. Ангары в MIS5e), при этом существенный вклад в колебания уровня воды вносило планетарное изменение климата (оледенение и межледниковье).

5. Основными причинами формирования комплекса террас на острове Большой Ушканый являются глобальное изменение климата и двукратное снижение уровня порога стока в районе Ливневичного залива.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ и CNRS (проект 20-55-15002\_НЦНИ / PRC 297213).*

#### **Литература**

Catastrophic events in the Quaternary out flow history of Lake Baikal / S. G. Arzhannikov, A. V. Ivanov, A. V. Arzhannikova, E. I. Demonterova, J. D. Jansen, F. Preusser, V. S. Kamenetsky, M. V. Kamenetsky // Earth-Science Reviews. 2018. Vol. 177. P. 76–113. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.11.011>

Lake Baikal highstand during MIS 3 recorded by palaeo-shorelines on Bolshoi Ushkanii Island / S. Arzhannikov, A. Arzhannikova, A. Ivanov, E. Demonterova, A. Yakhnenko, V. Gorovoy, J. Jansen // Boreas. 2021. Vol. 50. P. 101–113. <https://doi.org/10.1111/bor.12464>

## **ПАЛЕОСЕЙСМОГЕННЫЕ ДЕФОРМАЦИИ В ЗОНЕ МОНДИНСКОГО РАЗЛОМА (ТУНКИНСКАЯ СИСТЕМА ВПАДИН, БАЙКАЛЬСКИЙ РИФТ)**

**А. В. Аржаникова<sup>1</sup>, С. Г. Аржанников<sup>1</sup>,  
А. А. Чеботарев<sup>1</sup>, J.-F. Ritz<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup>University of Montpellier, France

[arzhan@crust.irk.ru](mailto:arzhan@crust.irk.ru)

Мондинский разлом, в зоне которого 04.04.1950 произошло сильное землетрясение с  $M_w = 6,9$  и левосторонним сдвиговым смещением по субширотно ориентированной плоскости в механизме очага [A reappraisal of the ... , 2002], до сих пор слабо изучен с точки зрения палеосейсмологии. Несмотря на то что после этого события неоднократно предпринимались попытки найти вышедшие на поверхность разрывы, определить кинематику разлома и продатировать предыдущие землетрясения [Geometry and kinematics ... , 2004; Тресков, Флоренсов, 2006; Lunina, Andreev, Gladkov, 2015; Стиль деформаций ... , 2016], период повторяе-

мости сильных землетрясений для Мондинского разлома до сих пор не определен. Дискуссионной остается и кинематика разлома. Если левосторонняя сдвиговая компонента смещения не вызывает сомнений, то насчет вертикальной компоненты смещения до сих пор нет однозначного решения [Geometry and kinematics ... , 2004; Стиль деформаций ... , 2016]. Для устранения противоречий и восполнения пробелов мы провели детальные морфотектонические и палеосейсмологические исследования в зоне Мондинского разлома. Исследования включали детальное топографическое картирование поверхностных деформаций с помощью тахеометра, построение и интерпретацию цифровой модели рельефа, вскрытие разлома траншеями, документацию стенок траншей и радиоуглеродное датирование деформированных горизонтов на двух обновленных участках разлома. Результаты исследований позволили определить взбросо-сдвиговый тип смещения по разлому и выделить как минимум четыре палеосейсмических события, которые произошли в зоне Мондинского разлома в последние ~13 тыс. лет.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ и CNRS (проект 20-55-15002\_НЦНИ / PRC 297213).*

#### **Литература**

A reappraisal of the 1950 ( $M_w$  6.9) Mondy earthquake, Siberia, and its relationship to the strain pattern at the south-western end of the Baikal rift zone / B. Delouis, J. Déverchère, V. Melnikova, N. Radziminovitch, L. Loncke, C. Larroque, J. F. Ritz, V. San'kov // Terra Nova. 2002. Vol. 14. P. 491–500.

Geometry and kinematics of recent deformation in the Mondy-Tunka area (south-westernmost Baikal Rift zone, Mongolia-Siberia) / A. Arjannikova, C. Larroque, J.-F. Ritz, J. Déverchère, J. F. Stéphan, S. Arjannikov, V. San'kov // Terra Nova. 2004. Vol. 16, N 5. P. 265–272.

Тресков А. А., Флоренсов Н. А. Мондинское землетрясение (отчет о результатах предварительного изучения землетрясения 4(5) апреля 1950 года) // Андрей Алексеевич Тресков. Иркутск : ИЗК СО РАН, 2006. С. 166–188.

Lunina O. V., Andreev A. V., Gladkov A. S. The 1950  $M_w = 6.9$  Mondy earthquake in southern East Siberia and associated deformations: facts and uncertainties // J. Seismol. 2015. Vol. 19, N 1. P. 171–189.

Стиль деформаций в зоне динамического влияния Мондинского разлома по данным георадиолокации (Тункинская впадина, юг Восточной Сибири) / О. В. Лунина, А. С. Gladkov, А. М. Афонькин, Е. В. Серебряков // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 9. С. 1616–1633.

## ГЛУБИННАЯ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА РАЗЛОМНЫХ ЗОН СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ

**Е. А. Баталева**

Научная станция РАН, г. Бишкек, Киргизская Республика  
bataleva@gdirc.ru

Метод магнитотеллурического зондирования (МТЗ) очень чувствителен к любым нарушениям сплошности горных пород (области повышенной трещиноватости, разломные структуры, зоны дробления и т. д.), которые являются одним из важнейших источников информации о геодинамических процессах, происходящих в земной коре [Баталева, 2016; Рыбин, Баталева, Матюков, 2018; Структуры чехла и поверхности ... , 2018].

Целью проведенного исследования был анализ глубинного геоэлектрического строения зон динамического влияния разломов Северного Тянь-Шаня на предмет взаимосвязи с современными геодинамическими процессами. Основными задачами являлись: детализация геоэлектрической структуры разломных структур [Рыбин, Баталева, Матюков, 2018]; развитие методики для изучения необратимых деформаций [Изучение необратимых ... , 2019]; изучение корреляционной зависимости электромагнитных и деформационных параметров [Структуры чехла ... , 2018]. Объектами исследований служили зоны динамического влияния таких разломов Тянь-Шаня, как Шамси-Тюндюкский (мини-полигон Кентор, Чуйская впадина) и Южно-Кочкорский (Кочкорская впадина) [Рыбин, Баталева, Матюков, 2018; Структуры чехла ... , 2018].

Показано распределение коэффициентов корреляции для 1) режимного пункта Укок, расположенного в Кочкорской впадине в непосредственной близости от зоны тектонического нарушения, где очень низкий уровень помех и достаточно высокий коэффициент корреляции между изменением кажущегося сопротивления и лунно-солнечными приливными воздействиями; 2) пункта № 4 профиля Кентор Центральный (мини-полигон Кентор), расположенного непосредственно над зоной Шамси-Тюндюкского разлома, перекрытой первыми сотнями метров четвертичных отложений, с высоким уровнем помех, в том числе и с влиянием ЭРГУ.

Проанализированы основные закономерности взаимосвязи поведения электромагнитных параметров зон динамического влияния разломных зон и современных геодинамических процессов.

Таким образом, в докладе рассмотрены новые результаты, полученные в последние годы в Северном Тянь-Шане при исследовании геоэлектрической структуры разломных зон [Баталева, 2016; Рыбин, Баталева, Матюков, 2018; Структуры чехла ... , 2018].

Выполненные работы показали, что МГЗ является эффективным методом для исследования зон динамического влияния разломных структур, а изучение анизотропии электропроводности таких зон может дать важную дополнительную информацию при создании надежных геодинамических моделей сейсмически активных регионов.

#### **Литература**

Баталева Е. А. Корреляционные зависимости электромагнитных и деформационных параметров // Доклады Академии наук. 2016. Т. 468, № 3. С. 319.

Рыбин А. К., Баталева Е. А., Матюков В. Е. Детализация геоэлектрической структуры зоны сочленения Чуйской впадины и Кыргызского хребта (миниполигон Кентор) // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2018. Т. 18, № 12. С. 134–140.

Структуры чехла и поверхности фундамента Кочкорской впадины (Тянь-Шань) по геологическим и геофизическим данным / Е. С. Пржиялговский, Е. В. Лаврушина, В. Ю. Баталев, Е. А. Баталева, М. Г. Леонов, А. К. Рыбин // Геология и геофизика. 2018. Т. 59, № 4. С. 417–436.

Изучение необратимых деформаций в литосфере Тянь-Шаня по магнитотеллурическим данным (методологический аспект) / В. Ю. Баталев, Е. А. Баталева, В. Е. Матюков, А. К. Рыбин // Вестник Камчатской региональной организации «Учебно-научный центр». Серия: Науки о Земле. 2019. № 2 (42). С. 42–56.

## **ЗАВИСИМОСТЬ ВЕЛИЧИНЫ ОФФСЕТА И МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСФОРМНЫХ РАЗЛОМОВ ОТ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗВИТИЯ ПРОВИНЦИЙ АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА**

**В. А. Боголюбский, Е. П. Дубинин**

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова  
г. Москва, Россия  
bogolubskiyv@yandex.ru

Рельеф трансформных разломов (ТР) практически полностью контролируется интенсивностью проявления эндогенных процессов. Однако степень влияния этих процессов на морфологию ТР различна в каждом конкретном случае и зависит от регионального геодинамического режима, определяющего их основные морфометрические параметры, такие как величина оффсета, ширина трансформной долины и высота приразломных хребтов, при их наличии. Основным параметром является величина оффсета, в зависимости от которой находятся остальные параметры. В то же время выявленные при физическом моделировании закономерности далеко не всегда проявляются в природных условиях, что зависит от ряда региональных факторов геологического строения территории [Dauteil, Bourgeois, Mauduit, 2002; Грохольский, Дубинин, 2010].

В пределах Срединно-Атлантического хребта степень влияния разных факторов на рельефообразование во многом зависит от принадлежности трансформных разломов к той или иной тектоно-магматической провинции Атлантики, которые различаются по возрасту своего формирования и условиями эволюции. При проведении морфометрического анализа 60 трансформных разломов Атлантики была выявлена зависимость величины оффсета и максимальной глубины трансформной долины, средний коэффициент корреляции для которых составил 0,72, что объясняется наибольшим сходством факторов, влияющих на эти показатели: плотности и прочности литосферы, температуры мантии, разницы возрастов блоков литосферы, разделенных трансформным разломом под ТР [Дубинин, 1987].

Был проведен морфографический анализ батиметрических данных и их сопоставление с гравитационными аномалиями для 15 трансформных разломов разных морфотектонических провинций Атлантики, который позволил на фоне общих рельефообразующих факторов, определяемых скоростью спрединга и аккрецией океанической коры, выявить влияние на рельеф ТР специфических факторов, характерных для каждой провинции. Среди этих факторов отметим следующие: унаследование до-раскольного геологического строения континентов (Южная провинция Атлантики), влияние горячих точек и прогретости мантии (Северная и Полярная провинции Атлантики), влияние относительно холодных зон мантии (Экваториальная Атлантика), влияние кинематических перестроек, определяющих наличие трансформации или трансформации в трансформных разломах, литодинамических и экзогенных процессов.

Таким образом, анализ особенностей строения трансформных разломов и развития различных провинций Атлантического океана позволил выявить основные и специфические факторы, определяющие рельеф и особенности строения трансформных разломов.

#### **Литература**

Грохольский А. Л., Дубинин Е. П. Структурообразование в рифтовых зонах и поперечных смещениях осей спрединга по результатам физического моделирования // Физика Земли. 2010. Т. 5. С. 49–55.

Дубинин Е. П. Трансформные разломы океанической литосферы. М. : Изд-во МГУ, 1987. 182 с.

Dauteuil O., Bourgeois O., Mauduit T. Lithosphere strength controls oceanic transform zone structure: Insights from analogue models // Geophys. J. Int. 2002. Vol. 150. P. 706–714.



# ОТРАЖЕНИЕ СКРЫТОГО РАЗЛОМА ФУНДАМЕНТА В ПЛОТНОСТНОЙ СТРУКТУРЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ МЯКИТ-ХУРЧАНСКОГО РУДНОГО РАЙОНА

**Н. К. Гайдай**

Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан, Россия  
Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт  
им. Н. А. Шило ДВО РАН, г. Магадан, Россия  
nataly\_mag@rambler.ru

Приуроченность многих рудопроявлений Северо-Востока России к гранитным интрузиям и к зонам тектоно-магматической активизации показана различными исследователями, в том числе и в авторских работах [Горячев, Гайдай, 2003; Вашилов, 2008; Особенности глубинного строения ... , 2017]. В большинстве случаев эти структуры не вскрыты на поверхности. Их установление возможно с использованием комплекса геофизических методов. В данной работе демонстрируется отражение скрытого разлома фундамента в плотностной структуре Мякит-Хурчанского рудного района, установленное с использованием гравиметрических методов.

Рудный район расположен в зоне сочленения Балыгычанского поднятия и Арmano-Вилигинского синклинория. В пределах его площади наблюдаются следы тектоно-магматической активизации мелового возраста. Все стратифицированные образования прорваны многочисленными дайками, штоками и массивами интрузивных пород позднеюрского и мелового времени. Осадочные породы на ряде участков смяты в сложные, преимущественно брахискладки различных простираний [Минерогеническое районирование ...]. Залегание пород нарушено разрывами. Основные разломы имеют северо-западное простирание, характерное для общего простирания структур Яно-Колымской складчатой системы. Разломы различны по времени заложения. Предполагается наличие скрытых разломов фундамента [Там же].

Методами интерпретации аномалий поля силы тяжести установлен рельеф плотностной границы расслоения в земной коре. В нем четко выделяется субмеридиональная зона погружения, которая прослеживается до глубины 33–45 км. Такое ее поведение свидетельствует о наличии в земной коре мощной плотностной аномалии, причина образования которой может быть связана с интенсивной переработкой глубинного вещества, вызванной (вероятнее всего) повышенным тепловым потоком, сопровождающим мощные магматические процессы. Данная зона пространственно совпадает с положением предполагаемого скрытого Хурчан-Оротуканского разлома фундамента, отраженного на современных тектонических схемах и геологических картах. Данные нашего исследо-

вания показывают, что эта зона прослеживается и южнее, в область Армано-Вилигинского синклинория.

#### **Литература**

Горячев Н. А., Гайдай Н. К. Рельеф кровли нескрытых плутонов ядра Оротуканского поднятия и локализация проявлений олово-редкометалльной минерализации // Колымские ВЕСТИ. 2003. № 24. С. 2–4.

Вашилов Ю. Я., Гайдай Н. К., Сахно О. В. Трехмерная глубинная плотностная модель Паутовского горста и ее геологическая интерпретация (Северо-Восток России) // Тихоокеанская геология. 2008. Т. 27, № 4. С. 22–38.

Особенности глубинного строения Аган-Утеснинского рудного узла по геофизическим данным / И. М. Хасанов, Н. К. Гайдай, А. П. Ганов, А. В. Ткачев // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2017. № 1. С. 32–43.

Минерагеническое районирование Мякит-Хурчанской площади и оценка природных ресурсов. URL: <http://studopedia.info/20-32529.html> (дата обращения: 13.01.2021).

## **РАЗЛОМЫ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО И СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО НАПРАВЛЕНИЙ ПРИАМУРЬЯ ПО КОМПЛЕКСНОМУ АНАЛИЗУ РЕЛЬЕФА И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

**Г. З. Гильманова**

Институт тектоники и геофизики им. Ю. А. Косыгина ДВО РАН  
г. Хабаровск, Россия  
[gigulya@yandex.ru](mailto:gigulya@yandex.ru)

Район Приамурья находится в северо-восточной части Амурской плиты. Сложное тектоническое строение и наиболее высокая на юге материковой части Дальнего Востока России сейсмичность обусловлены тройным сочленением трех тектонических поясов: Центрально-Азиатского, Монголо-Охотского и Тихоокеанского. Важную роль в геодинамической обстановке играют тектонические нарушения, в первую очередь Итунь-Иланьская ветка разлома Тан-Лу и близкие по ориентировке Хинганский, Мельгинский, Западно-Туранский разломы. Эти разломы СВ направления более всех других отображены на геологических картах ввиду высокой активности разломов Тан-Лу в мезозойско-кайнозойское время, когда произошло возрождение и новообразование деформационных зон. Сильные землетрясения ( $M \geq 5,0$ ) сосредоточены в зоне этого разлома, очаги мигрируют вдоль нее в северо-восточном направлении [Степашко, Меркулова, 2017].

На территории Приамурья выявлены современные сейсмоактивные зоны СЗ направления. Геологическими методами выделяется только крупный СЗ сегмент Южно-Тукурингского разлома [Забродин, Рыбас, Гильманова, 2015], в то время как в соседних с Приамурьем областях разломные зоны СЗ направления распространены широко и часто имеют

древний возраст. Выделенные ранее геофизическими методами разломные структуры СЗ ориентировки региона и сопредельной территории Восточного Китая рассматриваются как трансферные, т. е. поперечные к грабенообразующим разломам СВ направления.

В данной работе проведен комплексный линеаментный анализ разрывных нарушений СЗ и СВ направлений на основе обработки данных по гравитационному и магнитному полям, сейсмичности и рельефу (SRTM-03). Используются программы «КОСКАД-3D» [Петров, Юдин, Хоу Сюели, 2010], собственные разработки ИТиГ по обработке результатов космической радиолокационной съемки [Забродин, Рыбас, Гильманова, 2015] и программа WinLessa статистического анализа рельефа [Zlatopolsky, 1997]. Получена серия карт осей локальных и региональных компонент геофизических полей, линеаментов, степени расчлененности, линий вытянутости роз-диаграмм рельефа и др. Вся информация собрана в проект ArcGis.

Разрывные нарушения СВ направления достаточно уверенно выделяются геологическими и геофизическими методами и хорошо выражены в рельефе. Установлены наиболее протяженные из них, проведена оценка выделившейся сейсмической энергии. По геофизическим данным признаки разрывов СЗ направления в большей степени проявлены в аномалиях магнитного поля и частично в аномалиях гравитационного поля. Достаточно уверенно разрывы СЗ направления проявлены сгущениями линеаментов рельефа. Определены четыре протяженные разломные зоны северо-западного направления, сейсмоактивные на современном этапе. Сопоставление с данными по глубинному строению позволяет предположить, что отдельные зоны являются глубинными и древнего заложения.

*Исследование выполнено за счет гранта РФФИ 16-17-00015.*

#### **Литература**

Степашко А. А., Меркулова Т. В. Глубинная структура, генезис и сейсмическая активизация Буреинского орогена, Дальний Восток России // Тихоокеанская геология. 2017 Т. 36, № 4. С. 3–17.

Забродин В. Ю., Рыбас О. В., Гильманова Г. З. Разломная тектоника материковой части Дальнего Востока России. Владивосток : Дальнаука, 2015. 132 с.

Петров А. В., Юдин Д. Б., Хоу Сюели. Обработка и интерпретация геофизических данных методами вероятно-статистического подхода с использованием компьютерной технологии «КОСКАД 3D» // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. № 2. С. 126–132.

Zlatopolsky A. Description of texture orientation in remote sensing data using computer program LESSA // Computers&Geosciences. 1997. Vol. 23, N 1. P. 45–62.

## **РАЗЛОМООБРАЗОВАНИЕ И ФЛЮИДНЫЕ ПРОЦЕССЫ НА КОНВЕРГЕНТНЫХ ГРАНИЦАХ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ**

**И. В. Гордиенко, Н. С. Жатнуев**

Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия  
gord@pres.bsnet.ru

Разломообразование и флюидные процессы наиболее активно проявляются в переходной зоне океан – континент, пределах конвергентных границ литосферных плит, где в результате субдукции океанической коры формируются грандиозные островодужные системы, сопровождаемые интенсивной сейсмичностью с образованием разломов [Разломообразование в литосфере ... , 1994].

Известно, что главная роль в островодужном процессе принадлежит эндогенному веществу, поступающему в верхние горизонты Земли в виде мантийных и корово-мантийных магматических расплавов и флюидов. Среди них основную роль играет глубинный мантийный магматизм и связанные с ним процессы нагрева, декомпрессии и воздействия флюидов. Декомпрессионное плавление – это типичное плавление мантийного вещества на дивергентных границах в срединно-океанических хребтах. Ярким примером плавления под воздействием мантийных флюидов является плавление на конвергентных границах в зонах субдукции [Добрецов, 2010]. Магматизм разных конвергентных границ (коллизия, субдукция, трансформы) может происходить под воздействием всех трех вышеназванных факторов. Плавление в зонах субдукции формируется в результате дегидратации субдуцирующей плиты, при которой выделяющаяся вода поднимается выше, проникает в мантийный клин и там вызывает плавление. Плавление в коллизионных обстановках может быть результатом несколько иных, более сложных процессов. Здесь могут участвовать и флюиды, отделяющиеся от плиты, которая субдуцирована под окраину континента, а также причиной может быть и декомпрессия, возникающая при эрозии и денудация орогена, сформировавшегося при коллизии. Роль флюидов во всех случаях заключается в понижении температуры солидуса пород и инициации выплавления эвтектики и дальнейшего частичного плавления при температурах выше эвтектики.

Важнейшим аспектом этого процесса является отделение, сегрегация и транспорт флюидов в условиях высоких давлений и пластичности среды из области дегидратации в область частичного плавления. Это особенно касается зон субдукции, где дегидратация вызывает плавление в мантийном клине. Наиболее неясным и сложным процессом являются пути миграции флюидов по дренирующим разломам. В верхних горизонтах земной коры участие разломов в формировании аккреционных призм и вулканических построек не вызывает сомнений. Однако при

изучении реологии мантийных и коровых пород, особенно при высоких тепловых потоках в пределах мантийной литосферы и астеносферы, их роль весьма сомнительна. Нами разработана гипотеза, которая объясняет миграцию мантийных и субдукционных флюидов в разрезе пород высокой пластичности при отсутствии разломов. При реализации описанных в ней механизмов появление мантийных флюидов в областях магмаобразования не вызывает сомнений [Жатнуев, 2005; Жатнуев, 2016].

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 19-05-00312а).*

#### **Литература**

Разломообразование в литосфере / С. И. Шерман [и др.] // Зоны сжатия. Новосибирск : Наука, 1994. 262 с.

Добрецов Н. Л. Петрологические, геохимические и геодинамические особенности субдукционного магматизма // Петрология. 2010. Т. 18, № 1. С. 88–110.

Жатнуев Н. С. Трещинные флюидные системы в области пластических деформаций // Доклады РАН. 2005. Т. 404, № 3. С. 380–384.

Жатнуев Н. С. Трансмантийные (интрателлурические) флюиды: новая модель плюмов и плюмового магматизма // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 8. С. 1445–1454.

## **СОВРЕМЕННАЯ ТЕКТНИКА И СЕЙСМИЧНОСТЬ ВЕРХНЕГО ПРИАМУРЬЯ**

**В. С. Жижерин**

Институт геологии и природопользования ДВО РАН  
г. Благовещенск, Россия  
votarist@ascnet.ru

Согласно общепринятым представлениям, геодинамический режим на территории Верхнего Приамурья контролируется транспрессионным механизмом взаимодействия Евразийской и Амурской литосферных плит. На более детальном уровне в западной части исследуемого региона современная геодинамическая активность связана с процессами растяжения земной коры, обусловленными развитием северо-восточного крыла Байкальской рифтовой системы. В районе среднего течения р. Олекмы доминирующие тектонические напряжения изменяют свой тип и направление на характерное для Становой области субмеридиональное сжатие с наличием сдвиговой компоненты [Имаева, Имаев, Козьмин, 2012].

Уникальное тектоническое положение изучаемого региона не могло не отразиться на характере происходящих здесь деформационных процессов и сейсмотектоническом режиме. Результаты проведенных на выделяемой территории исследований современных движений земной коры [Жижерин, Серов, 2016] отображают наличие сложной картины распределения деформационных процессов. Вычисленные значения скорости дилатации [Современные деформации ... , 2018] показывают, что на

схеме блоковой делимости области растяжения земной коры приурочены к местам пересечения крупных разломных систем, а их амплитуда в несколько раз выше значений, вычисленных для областей сжатия. Пространственное положение последних тяготеет к внутренним участкам крупных блоков земной коры.

Анализ значимых сейсмических событий ( $M > 4$ ), произошедших на изучаемой территории за последние полвека инструментальных наблюдений, свидетельствует о том, что сейсмичность локализована в зонах влияния крупных глубинных разломов, разграничивающих основные тектонические единицы. Наиболее сейсмогенные структуры сосредоточены вблизи зоны сочленения Джелтулакской и Тукурингрской разломных систем, в то время как внутренние участки крупных тектонических блоков асейсмичны.

#### **Литература**

Имаева Л. П., Имаев В. С., Козьмин Б. М. Сейсмогеодинамика Алдано-Станового блока // Тихоокеанская геология. 2012. Т 31, № 1. С. 5–17.

Жижерин В. С., Серов М. А. Кинематика современных тектонических движений в пределах восточной части Монголо-Охотского складчатого пояса // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 12. С. 2143–2152.

Современные деформации Верхнего Приамурья по данным GPS измерений / С. В. Ашурков, М. А. Серов, В. С. Жижерин, В. С. Имаев // Тихоокеанская геология. 2018. Т. 37, № 5. С. 86–9.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНЫХ ЗОН ПРИБАЙКАЛЬЯ МЕТОДАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ**

**Г. Н. Иванченко, Э. М. Горбунова**

Институт динамики геосфер им. академика М. А. Садовского РАН  
г. Москва, Россия  
ivanchenko@idg.chph.ras.ru

Доклад посвящен анализу морфоструктур и активности линеаментов в зоне сочленения Сибирской платформы и Байкальской рифтовой зоны (БРЗ). Исследования проводились с помощью формализованного линеamentного анализа (технология LESSA), позволяющего выделять на космических снимках и цифровых моделях рельефа малые и протяженные линеаменты и исследовать их угловые статистические характеристики [Златопольский, 2008]. Этот анализ проводился на региональном и локальном масштабных уровнях.

Показана связь структурного рисунка линеаментов и параметров их формального выделения на космоснимках и цифровых моделях рельефа (ЦМР) с геологическим строением и геодинамикой региона, возрастом активизации соответствующих им кайнозойских дизъюнктивов, а на локальном уровне – с кинематикой разломов. Применение компьютерного

дешифрирования позволило оценить влияние тектонических напряжений БРЗ на плиоцен-четвертичные движения юга Сибирской платформы и формирование морфоструктур в этом регионе. Обсуждается связь активности разломов (в том числе некоторые аспекты сейсмичности) с угловой статистикой линеаментов, а также некоторые геодинамические модели развития Прибайкалья и его морфоструктурное районирование [Семинский, Черемных, 2011]. Получены следующие основные результаты.

– Программный комплекс LESSA обладает большой вариативностью выделения и пространственного анализа линейных элементов изображения, что позволяет подбирать параметры в соответствии с поставленными задачами и масштабным уровнем линеаментного анализа.

– Формализованный линеаментный анализ дает возможность получать результаты, доступные для проверки другими исследователями, и в то же время, гарантировать объективность некоторых свойств изображения, интерпретируемых как особенности геологической среды.

– Статистические методы исследования, такие как плотность линеаментов, вектора вытянутости роз-диаграмм и их визуализация в форме структурных линий, применяются для выявления внутренней структуры разломных зон, их кинематики и элементов залегания плоскостей разломов.

– Интерпретация особенностей выраженности линеаментов и их угловая статистика в условиях платформенных и рифтовых областей (Прибайкалье) для космоснимков и ЦМР позволяет подтвердить блоковую делимость земной коры, уточнить внутреннюю структуру блоков и межблоковых зон и выявить наиболее активные в плейстоцене нарушения. При этом использование ЦМР по сравнению с космическими снимками выявляет наиболее молодые линейные объекты, возраст которых не превышает возраста рельефа.

– Анализ рисунка линеаментов форм и угловых характеристик пространственного распределения малых линеаментов способствует выделению потенциально сейсмоактивных структур и некоторых особенностей современного и плиоцен-четвертичного напряженного состояния земной коры региона. При этом статистика по космоснимкам и ЦМР систематически различается и отражает несколько разные наборы линеаментов по времени их формирования

*Исследование выполнено по теме госзадания № АААА-А19-119021890087-8.*

#### **Литература**

Златопольский А. А. Методика измерения ориентационных характеристик данных дистанционного зондирования (технология LESSA) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 1, № 5. С. 102–112.

Семинский К. Ж., Черемных А. В. Трещинные сети и напряженное состояние кайнозойских осадков Байкальского рифта: новые возможности структурно-парагенетического анализа // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 3. С. 450–469.

# СТРУКТУРНО-ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СДВИГОВОЙ СИСТЕМЫ РАЗЛОМОВ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКОЙ ЗОНЫ ЧЕРСКОГО

Л. П. Имаева<sup>1</sup>, В. С. Имаев<sup>1</sup>, Б. М. Козьмин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН

г. Якутск, Россия

imaeva@crust.irk.ru

Сдвиговая система разломов сейсмостектонической зоны Черского приурочена к коллажу террейнов Колымо-Омолонской складчатой системы и является самым крупным структурообразующим разрывным нарушением Арктико-Азиатского сейсмического пояса. Она образована в условиях транспрессии (сжатие со сдвигом), где имеет место определенная динамическая обстановка, инициированная взаимодействием фронтальных структур зон контактного сопряжения Евразийской и Северо-Американской литосферных плит, движущихся друг к другу с разными скоростями [Имаева, Имаев, Козьмин, 2016; Имаева, Имаев, Koz'min, 2016]. При сближении плит роль активного индентора выполнял Колымо-Омолонский блок, находящийся во фронтальной части Северо-Американской плиты. Результат такого воздействия проявился в формировании перед фронтальной частью индентора расходящихся северо-западных (левых) и юго-восточных (правых) сдвигов, формирующих на своих окончаниях сейсмогенерирующие зоны взбросов и надвигов. Для системы разломов характерен весь набор признаков, известных для подобных разрывных систем мира: значительная протяженность; наличие центрального сдвигового шва в форме прямолинейного разлома и системы эшелонированных нарушений; асимметричный геометрический рисунок опережающих центральный шов складок и разрывов; пояс интрузии, располагающийся несколько в стороне от шва и породы широкого стратиграфического диапазона. В зоне динамического влияния системы разломов сейсмостектонической зоны Черского обнаружено множество следов древних и современных сейсмодислокаций, образовавшихся в результате катастрофических землетрясений с магнитудой  $M_w \geq 7,0$ . В сейсмостектоническом плане система подразделяется на несколько крупных региональных разрывных нарушений с развитием в их пределах характерных парагенезисов активных структур, динамика которых обусловлена определенным типом напряженного состояния земной коры континентальной части границы между Евразийской, Северо-Американской и Охотоморской литосферными плитами. Представленная структурно-динамическая модель позволяет установить закономерности формирования активных структур различных кинематических типов и выявить блоки-концентраторы тектонических напряжений, обладающие повышенным уровнем сейсмического потенциала ( $M_w \geq 7,0$ ).



*Исследование выполнено при поддержке РФФИ № 19-05-00062 «Динамика новейших структур континентально-шельфовой зоны северо-восточного сектора Российской Арктики».*

#### **Литература**

Имаева Л. П., Имаев В. С., Козьмин Б. М. Динамика сейсмогенерирующих структур фронтальной зоны Колымо-Омолонского супертеррейна // Геотектоника. 2016. № 4. С. 3–21. <http://doi.org/10.7868/S0016853X16040044>

Imaeva L. P., Imaev V. S., Koz'min B. M. Structural-dynamic model of the Chersky seismotectonic zone (continental part of the Arctic-Asian seismic belt) // Journal of Asian Earth Sciences. 2016. V. 116. P. 59–68. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.11.010>

## **ВЛИЯНИЕ РАЗЛОМООБРАЗОВАНИЯ НА АНИЗОТРОПИЮ СКОРОСТНОЙ СТРУКТУРЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ЮЖНОЙ ОКРАИНЫ СИБИРСКОГО КРАТОНА**

**М. М. Кобелев<sup>1,2</sup>, В. В. Мордвинова<sup>1</sup>, М. А. Хритова<sup>1,2</sup>,  
Е. А. Кобелева<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Иркутск, Россия

[hritova@crust.irk.ru](mailto:hritova@crust.irk.ru)

Тема исследования сейсмической скоростной анизотропии становится все более важной при решении фундаментальной задачи изучения структуры, состава и геодинамики отдельных регионов Земли, в частности сейсмически активной Саяно-Байкальской складчатой области. Ранее здесь по данным наблюдений международных сейсмических профилей PASSCAL и MOBAL проведен ряд исследований анизотропии. Вдоль этих протяженных (тысячекилометровых) профилей исследована сейсмическая анизотропия методом SKS [Evidence for ... , 2003; Upper mantle ... , 2008]. Метод SKS, предложенный Львом Винником [Винник, Косарев, Макеева, 1984] и теперь широко применяемый во всем мире, определяет наличие скоростной анизотропии в верхнемантийной толще с хорошим разрешением по латерали. Однако интерпретация величины запаздывания медленной волны затруднительна, поскольку только по SKS сложно судить о конкретном интервале глубин, в котором это запаздывание накапливается. Полезен комплексный подход, в котором необходимой составляющей является исследование распределения скорости сейсмических волн в регионе наблюдения не только, как обычно, по глубине, но и по азимутам [Combined analysis ... , 2002].

Интерпретация анизотропии вызвала много споров, но в настоящее время выявлено, что глубинное строение не такое примитивное, как предполагалось ранее. В частности, на основании исследований на юге

Сибири и в Монголии побеждает точка зрения об определяющей роли Индо-Евразийской коллизии в формировании скоростных неоднородностей, в том числе скоростной анизотропии. Именно в свете концепции Индо-Евразийской коллизии логично объясняется величина расщепления и направления быстрых волн, которые ориентированы перпендикулярно коллизионному направлению сжатия и, соответственно, параллельно возможному порождаемому коллизией современному глубинному течению.

Методом продольной приемной функции [Vinnik, 1977; Receiver functions ... , 1993] наиболее детально и вплоть до глубины 270 км исследована скоростная структура Саяно-Байкальской складчатой области. Следует подчеркнуть, что это стало возможным благодаря многолетним телесеismicким наблюдениям пятью цифровыми широкополосными сейсмическими станциями. В результате скорости сейсмических волн  $V_S(h)$  определены в пределах земной коры со средним шагом по глубине 1 км, в пределах мантии – с шагом 5–10 км. Точность определения значений скорости волн  $\pm 0,1$  км/с. Одномерные разрезы «глубина – скорость» рассчитаны для различных направлений относительно каждого из пунктов наблюдений (Саянск, Тырган, Орлик, Монды, Закаменск) согласно обратным азимутам (BAZ) использованных землетрясений. На основании найденных значений  $V_S(h, \text{BAZ})$  построен комплекс моделей, в том числе трехмерные круговые модели  $V_S(h, \text{BAZ}, d)$  – горизонтальная проекция конусообразного объема среды, прозондированного с разных сторон сейсмическими лучами (радиус конуса модели определяется средним углом падения этих лучей). Круговые модели  $V_S(h, \text{BAZ}, d)$  наглядно демонстрируют скоростную неоднородность в различных направлениях от пункта наблюдения и вычисляют анизотропию среды, проявляющуюся в горизонтальной проекции круговых моделей наличием оси симметрии, которая хотя несколько варьирует с глубиной, но в среднем имеет ориентацию СЗ–ЮВ.

Полученные результаты свидетельствуют: удаленное воздействие Индо-Азиатской коллизии на зону контакта южной окраины Сибирского кратона с Центрально-Азиатским подвижным поясом подтверждается наличием в этой зоне глубинной азимутальной сейсмической анизотропии, проявляющейся повышенной скоростью сейсмических волн в верхней мантии в перпендикулярном коллизии юго-восточном направлении относительно пунктов наблюдения, что может быть объяснено преимущественным закрытием трещин в земной коре в этом направлении и уплотнением мантийных масс.

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках госзадания № 075-01304-20) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».*

## Литература

Evidence for small-scale mantle convection in the upper mantle beneath the Baikal rift zone / S. S. Gao, K. H. Liu, P. M. Davis, P. D. Slack, Y. A. Zorin, V. V. Mordvinova, V. M. Kozhevnikov // *Journal of Geophysical Research*. 2003. Vol. 108, N B4. 2194. <https://doi.org/10.1029/2002JB002039>.

Upper mantle flow beneath and around the Hangay dome, Central Mongolia / G. Barruol, A. Deschamps, J. Deverchere, V. Mordvinova, M. Ulziibat, J. Perrot, A. Artemiev, T. Dugarmaa, G. Bokelmann // *Earth and Planetary Science Letters*. 2008. Vol. 274, N 1. P. 221–233. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2008.07.027>.

Винник Л. П., Косарев Г. Л., Макеева Л. И. Анизотропия по наблюдениям волн SKS и SKKS // Доклады Академии наук СССР. 1984. Т. 278, № 6. С. 1335–1339.

Combined analysis of SKS splitting and regional P traveltimes in Siberia / S. Oreshin, L. Vinnik, L. Makeyeva, G. Kosarev, R. Kind, F. Wentzel // *Geophysical Journal International*. 2002. Vol. 151, Iss. 2. P. 393–402. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2002.01791.x>.

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

Receiver functions for the Tien Shan analog broadband network: contrast in the evolution of structures across the Talasso-Fergana fault / G. L. Kosarev, N. V. Petersen, L. P. Vinnik, S. W. Roecker // *Journal of Geophysical Research*. 1993. Vol. 98, Iss. B3. P. 4437–4448. <https://doi.org/10.1029/92JB02651>

## СОВРЕМЕННАЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ РАЗЛОМОВ (ИНДУЦИРОВАНИЕ, ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ, РАСПРОСТРАНЕНИЕ)

**Ю. О. Кузьмин**

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия  
[kuzmin@ifz.ru](mailto:kuzmin@ifz.ru)

Многочисленные и многолетние геодинамические наблюдения, проводимые в зонах разломов сейсмоактивных и слабосейсмичных регионов методами наземной и спутниковой геодезии, выявили устойчивый пространственно-временной спектр аномальных движений земной поверхности [Кузьмин, 1989, 1999, 2019а; Сидоров, Кузьмин 1989].

Исследование соотношения между скоростями региональных и локальных компонент общего хода деформационного процесса позволило разработать механизм параметрического индуцирования локальных деформаций в разломных зонах малыми природно-техногенными воздействиями, в обстановке квазистатического (мягкого) регионального нагружения [Кузьмин, 1989, 2018, 2019б, 2021].

Было установлено существование пространственно-временной миграции современных локальных деформаций от разлома к разлому и внутри их активных фрагментов с близкими скоростями распространения для различных регионов, и предложен автоволновой механизм их формирования [Кузьмин, 2012, 2020].

Детальный анализ взаимодействия локальных деформационных процессов показал, что в пространственно-временных особенностях миграции существует не только типичная для нелинейных процессов аннигиляция (взаимное уничтожение встречных фронтов смещений), но и явление туннелирования и «просачивание» деформаций сквозь зоны со слабой способностью к параметрическому возбуждению.

*Работа выполнена в рамках госзадания 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.
- Сидоров В. А., Кузьмин Ю. О. Пространственно-временные характеристики современной динамики геофизической среды сейсмоактивных и асейсмичных областей // Дискретные свойства геофизической среды. М. : Наука, 1989. С. 33–46.
- Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании. М. : Агентство экономических новостей, 1999. 220 с.
- Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика: от движений земной коры до мониторинга ответственных объектов // Физика Земли. 2019а. № 1. С. 78–103.
- Кузьмин Ю. О. Деформационные автоволны в разломных зонах // Физика Земли. 2012. № 1. С. 3–20.
- Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика и медленные деформационные волны // Физика Земли. 2020. № 4. С. 172–182.
- Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика раздвиговых разломов // Физика Земли. 2018. № 6. С. 87–105.
- Кузьмин Ю. О. Индуцированные деформации разломных зон // Физика Земли. 2019б. № 5. С. 61–75.
- Кузьмин Ю. О. Геодинамическая эволюция Центральной Азии и современная геодинамика Копетдагского региона (Туркменистан) // Физика Земли. 2021. № 1. С. 144–153.

## **ПРИРАЗЛОМНЫЕ ТЕКТОНИТЫ ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА: P-T-t-d-ЭВОЛЮЦИЯ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ**

**И. И. Лиханов<sup>1</sup>, Ж.-Л. Реньё<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН  
г. Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Университет Мугла, г. Мугла, Турция  
likh@igm.nsc.ru

В пределах Приенисейской региональной сдвиговой зоны (ПРСЗ) Енисейского кряжа изучены метапелиты и метабазиты, подвергшиеся интенсивным деформациям с перекристаллизацией субстрата и образованием тектонитов [Likhanov, Santosh, 2017]. Выявленные различия в P-T-параметрах метаморфизма между сильно- и слабдеформированными породами и конфигурации P-T-t-d-трендов, рассчитанные с использо-

ванием минеральной геотермобарометрии и псевдосечений в системе NCKFMASH, обсуждены в рамках геодинамических моделей, контролируемых разными тектоническими механизмами [Likhanov, Régnier, Santosh, 2018]. Полихронный динамометаморфизм гнейсов Ангаро-Канского блока на юге и формирование основной массы бластомилонитов северного сегмента ПРСЗ происходили с повышением давления на 1,5–3 кбар при незначительном увеличении температуры с низким метаморфическим градиентом  $dT/dH < 10$  °C/км в сравнении с фоновыми значениями более раннего регионального метаморфизма, что, вероятно, было обусловлено утолщением земной коры в результате быстрого надвига/субдукции с последующим быстрым подъемом пород [Лиханов, 2020]. Максимальные превышения термодинамических параметров метаморфизма установлены в тектонитах базитового состава с реликтовыми глаукофансланцевыми ассоциациями, которые подверглись метаморфизму с одновременным значительным ростом давления на 3–5 кбар и температуры на 180–240 °C при более высоком градиенте  $dT/dH = 15–20$  °C/км. Такие превышения  $P$ - $T$ -параметров могли быть связаны с прогрессивным метаморфизмом, осложненным локальным разогревом пород при вязких деформациях [Burg, Gerya, 2005] и превышением ориентированного тектонического давления над литостатическим в зонах пластического сдвига [Schmalholz, Podladchikov, 2013]. Полученные данные хорошо согласуются с результатами численных экспериментов, что подтверждает представления о роли тектонического стресса как дополнительного термодинамического фактора метаморфических преобразований в шовных зонах земной коры.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-00152.*

#### **Литература**

Likhanov I. I., Santosh M. Neoproterozoic intraplate magmatism along the western margin of the Siberian Craton: implications for breakup of the Rodinia supercontinent // Precambrian Research. 2017. Vol. 300. P. 315–331.

Likhanov I. I., Régnier J.-L., Santosh M. Blueschist facies fault tectonites from the western margin of the Siberian Craton: Implications for subduction and exhumation associated with early stages of the Paleo-Asian Ocean // Lithos. 2018. Vol. 304–307. P. 468–488.

Лиханов И. И. Метаморфические индикаторы геодинамических обстановок коллизии, растяжения и сдвиговых зон земной коры // Петрология. 2020. Т. 28, № 1. С. 4–22.

Burg J. -P., Gerya T. V. The role of viscous heating in Barrovian metamorphism: thermo-mechanical models and application to the Lepontine Dome in the Central Alps // J. Metamorphic Geol. 2005. Vol. 23. P. 75–95.

Schmalholz S. M., Podladchikov Y. Y. Tectonic overpressure in weak crustal-scale shear zones and implications for exhumation of high-pressure rocks // Geophysical Res. Letters. 2013. Vol. 40. P. 1984–1988.

# СОВРЕМЕННОЕ РАЗРЫВООБРАЗОВАНИЕ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ЗУНДУКСКОГО РАЗЛОМА НА ПОБЕРЕЖЬЕ МАЛОГО МОРЯ ОЗЕРА БАЙКАЛ

О. В. Лунина<sup>1</sup>, А. А. Гладков<sup>1,2</sup>, И. А. Денисенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Детский технопарк «Кванториум Байкал» ГАУ ДО ИО «Центр развития дополнительного образования детей», г. Иркутск, Россия  
lounina@crust.irk.ru, anton90ne@rambler.ru

Зундукский разлом протягивается на 73 км вдоль береговой линии пролива Малое Море оз. Байкал от м. Ядыртуй до пос. Зама на суше и далее уходит в акваторию озера (<http://activetectonics.ru/indexeng.html>). В структурном отношении он является северо-восточным ответвлением генерального Приморского разлома. Оба дизъюнктива считаются сейсмоактивными, поэтому исследование деформаций в их зонах представляет большой научный интерес. Последний ведет к пониманию сейсмического потенциала разломов и ряда других смежных вопросов. В связи с этим для детального картирования палеосейсмогенных разрывов в зоне Зундукского разлома нами на избранных полигонах проведена аэрофотосъемка с использованием БПЛА DJI Phantom 4 Pro V 2. 0.

По данным высокоточной аэрофотосъемки составлены ортофотопланы и цифровые модели местности участков с пространственным разрешением от 3,5–4 до 10–11 см/пиксель. В результате их дешифрирования, помимо палеосейсмогенных уступов, в конусах выноса водотоков впервые обнаружены молодые разрывы, отнесенные по возрасту формирования к современным, так как согласно геологическим картам первого поколения масштаба 1:200 000 (листы N-48-XXX и N-48-XXIV) они нарушают современные галечники, пески, суглинки и реже неразделенные четвертичные валунно-галечные отложения. Эти дислокации сильно отличаются от первой группы разрывов своей прямолинейностью, малыми высотами уступов в первые десятки сантиметров, наличием в некоторых случаях следов сдвиговых смещений и особенностями распространения. Наибольшее количество таких нарушений сосредоточено на мысе Ото-Хушун, где их развитие, как оперяющих структур, происходит в узле пересечения северо-восточного Зундукского и предполагаемого в акватории оз. Байкал север-северо-западного разломов, чем объясняется блочное строение сети разрывов в юго-западной части мыса. Георадиолокационное профилирование показало, что поверхностные нарушения проникают на глубину как минимум нескольких метров. Поскольку последнее разрывообразующее землетрясение в зоне Зундукского разлома, как предполагается, имело место 12–14 тыс. лет назад [Чипизубов, Сماعيل, Имаев, 2015], выявленные в современных отложениях разрывы

могут быть результатом криповых смещений. Механизм их образования связывается с периодическим воздействием слабых сейсмических нагрузок на гранулированную среду, в результате чего происходят микросмещения и последующий рост разрывов. Выявление подобных разрывных деформаций и мониторинг их развития в дельтах рек и конусах выноса водотоков важны для прогнозирования возможных мест обрушения прибрежных участков оз. Байкал при умеренных и сильных землетрясениях, а также для изучения динамики развития берегов – важного компонента абиотической части экосистемы озера.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 20-45-385001.*

#### **Литература**

Чипизубов А. В., Смекалин О. П., Имаев В. С. Палеосейсмодислокации и палеоземлетрясения зоны Приморского разлома (оз. Байкал) // Вопросы инженерной сейсмологии. 2015. Т. 42, № 2. С. 63–77.

## **ОСОБЕННОСТИ ОДНОАКТНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СМЕЩЕНИЙ ВДОЛЬ ДЕЛЬТОВОГО РАЗЛОМА В ГОЛОЦЕНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ РАЗЛИЧНОЙ КОМПЕТЕНТНОСТИ (БАЙКАЛЬСКИЙ РИФТ)**

**О. В. Лунина, И. А. Денисенко**

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

Тектоническое смещение является важнейшим параметром при определении сейсмического потенциала разлома. Его распределение по простиранию структуры сильно изменчиво, поэтому при оценке сейсмической опасности существенное значение имеет как качество, так и количество измерений одноактных амплитуд смещений. Мы реконструировали и изучили особенности распределения одноактных вертикальных смещений вдоль сухопутной части Дельтового разлома, активизированного при Цаганском землетрясении 12.01.1862 с магнитудой  $M-7,5$  на юго-восточном побережье оз. Байкал. На местности в эпицентральной зоне эта структура выражена уступом в голоценовых отложениях, представленных песками, суглинками и супесями с прослоями глин и гравия, которые при сейсмическом событии испытали значительное разжижение и флюидизацию.

В качестве базового метода в наших исследованиях использовалась георадиолокация в комплексе с данными малоглубинного бурения, тренчинга и анализом топографических профилей. Путем измерений на радарограммах вертикальной амплитуды «в ближней зоне», непосредственно на плоскости разрывов (хрупкой компоненты), и «в дальней зоне» на удалении от сместителя (сумма хрупкой и пластической компонент в соответствии с концептуальной моделью [The brittle and ductile ... , 2017]), мы вычислили вклад пластической составляющей в общее смещение. Кроме того, мы рассмотрели ряд других параметров во взаимосвязи с величиной последней одноактной подвижки в верхнем осадочном слое на глубине первых метров. В результате подтверждено, что смещение при землетрясении 1862 г. реализовалось в условиях СЗ–ЮВ растяжения путем формирования ступенчатой системы сбросов с падением главного сместителя на СЗ под углами 56–76°. Полные вертикальные амплитуды по зоне разрывов, включающие обе компоненты смещения, по данным георадиолокации составили 1,81–9,59 м, что с ошибкой 0,03–0,47 м соответствует вертикальному смещению, определенному по геометрии разломного уступа с учетом падения главного сместителя. Разрывные компоненты деформации изменяются от 1,58 до 6,07 м, вклад пластической компоненты в общее смещение варьирует от 13 до 42 %, видимая ширина зоны разрывов – от 2,55 до 20 м. Максимальные вклады пластической компоненты смещения соответствуют минимальным углам падения главного сместителя и в целом наибольшим мощностям зон нарушений. Последняя в свою очередь хорошо коррелирует с величиной подвижки.

Особенности строения зон разрывов и смещений в рыхлых осадках необходимо учитывать при измерении последних в непротяженных канавах (первые метры в длину), чтобы избежать недооценки магнитуд сбросовых землетрясений. В случае наличия рыхлых отложений смешанной реологии (компетентных и некомпетентных), очевидно, следует ожидать большие величины полных смещений и более широкие зоны деформаций по сравнению с однородными разрезами.

*Работа выполнена в рамках базового бюджетного проекта лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН.*

#### **Литература**

The brittle and ductile components of displacement along fault zones / C. Homberg, J. Schnyder, V. Roche, V. Leonardi, Benzaggagh // Geol. Soc. Lond., Special Publications. 2017. Vol. 439. P. 395–412.



# ДИЗЬЮНКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ ОБЛАСТИ СОЧЛЕНЕНИЯ КОНТИНЕНТ – ОКЕАН ЮЖНОЙ ЧАСТИ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА РОССИИ

**Ю. Ф. Манилов, Е. Г. Иволга**

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

Изученная территория включает окраину континента от Магадана до юга Приморья и прилегающие Охотское и Японское моря. В тектоническом отношении это область взаимодействия Евроазиатской, Амурской, Охотской, Тихоокеанской и Северо-Американской плит. Центральное место занимает Охотская плита.

За основу унифицированного представления о границе континент – океан и изучения дизьюнктивных систем региона принимались гравиметрические данные. Это обусловлено высокой глубиной метода и широким охватом площадной информацией, покрывающей континентальную и морскую части территории.

Цель настоящих исследований – картирование и глубинный анализ основных дизьюнктивных систем региона на основе разносторонней интерпретации гравиметрической информации. В первую очередь ставилась задача оценить возможность прослеживания континентальных нарушений в пределы морских акваторий и наоборот.

В качестве опорных материалов использованы карты гравитационного поля разных масштабов, обработанные и приведенные к единой цифровой матрице  $2 \times 2$  км гравитационного поля изучаемой территории в редукции Буге с плотностью промежуточного слоя  $2,67 \text{ г/см}^3$ .

Для анализа использован комплекс спектрально-корреляционного анализа данных «КОСКАД 3D» [Никитин, Петров, 2010], который позволил построить плотностные 3D-модели. Структурные особенности моделей изучены на основе серии карт разноглубинных срезов и разрезов.

В современной картине дизьюнктивной тектоники преобладают сложно пересекающиеся системы разломов северо-восточного и северо-западного направлений.

Деструктивный механизм формирования характерен для континентальных северо-восточных дизьюнктивных систем, конструктивный – для северо-западных океанических. Ортогональным системам свойственна разнонаправленная динамика развития. Меридиональная система, образовавшаяся в результате Хоккайдо-Сахалинской аккреции, деградировала, в то время как широтная развивалась в результате пограничного скольжения Охотоморской и Амурской плит в условиях сжатия, образуя тренд широтных нарушений в указанных плитах.

Крупные системы нарушений в литосфере имеют мантийную природу и контролируются мантийными диапирами: на континенте в основном повышенной плотности, в морской акватории – пониженной.

На разрезах сеть разрывных нарушений представлена сложно пересекающимися системами разломов восточного и западного падений. Вертикальные разломные системы на разрезах проявлены слабо.

Для северо-западной части территории более характерны пологие, падающие под более древние структуры нарушения, преимущественно западного падения, вероятно, связанные с субдукционными процессами. На остальной части подобные нарушения являются элементами блокировки двух основных глубинных структур: на севере – синклинального типа, на юге – антиклинального. За пределами Курильской дуги, на крайнем юго-востоке территории, картина нарушений заметно меняется, и это предмет для дальнейшего исследования.

#### **Литература**

Никитин А. А., Петров А. В. Теоретические основы обработки геофизической информации : учеб. пособие, 2-е изд. М. : Центр информационных технологий в природопользовании, 2010. 114 с.

## **ОБЗОР МЕТОДОВ РЕКОНСТРУКЦИИ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ ПО НЕОДНОРОДНЫМ ВЫБОРКАМ ДАННЫХ ПО ЗЕРКАЛАМ И БОРОЗДАМ СКОЛЬЖЕНИЯ**

**А. Н. Москаленко, Е. А. Павловская, А. В. Кушнарева, А. К. Худoley**

Санкт-Петербургский государственный университет  
г. Санкт-Петербург, Россия  
moskalenko@pm.me

Сепарация неоднородного массива данных зеркал и борозд скольжения для последующей реконструкции параметров напряженно-деформированных состояний является актуальной задачей современной структурной геологии. Для тестирования различного программного обеспечения в модуле AmontonWin программы T-ТЕСТО [Žalohar, Vrabc, 2007] нами был сгенерирован искусственный неоднородный массив данных, который включает в себя (1) 45 замеров, отвечающих разрывным нарушениям, сформированным в обстановке горизонтального растяжения ( $180^\circ/0^\circ$ ) и вертикального сжатия ( $0^\circ/90^\circ$ ); а также (2) 45 замеров, перемещения по которым отвечают разломам, сформированным при горизонтальной ориентировке осей растяжения ( $150^\circ/0^\circ$ ) и сжатия ( $240^\circ/0^\circ$ ) соответственно. Для реконструкции полей напряжений по

этим данным использовались методы катакластического анализа, STRESSgeol [Ребецкий, 1997], инверсии и статистического анализа, включающего метод правильных диэдров и функцию оптимизации минимальных углов несоответствия, Tensor [Delvaux and Sperner, 2000], множественной инверсии, MIM [Yamaji, 2000], Гаусса, Т-ТЕСТО [Žalohar, Vrabec, 2007] и неоднородного генетического алгоритма, HGA [Thakur, Srivastava, Gupta, 2020]. Каждый метод выполняет сепарацию данных, позволяя выделить искомые выборки перемещений по разломам и реконструировать по ним поля напряжений. В целом все программы удовлетворительно реконструировали исходные поля напряжений, хотя в рабочем процессе сепарации данных присутствуют отличия. Общим для всех методов является то, что они не позволяют автоматически (1) определить последовательность деформационных событий и (2) достоверно установить число возможных этапов деформаций, предлагая в ряде случаев выделить дополнительные этапы. Для корректной реконструкции эволюции полей напряжений необходимо привлечение данных по другим индикаторам тектонического напряжения и экспертное мнение геолога, который знаком с объектом исследования и может оценить возможность геологической интерпретации выделенных полей напряжений.

#### **Литература**

Žalohar J., Vrabec M. Paleostress analysis of heterogeneous fault-slip data: The Gauss method // *Journal of Structural Geology*. 2007. Vol. 29, N 11. P. 1798–1810.

Ребецкий Ю. Л. Реконструкция тектонических напряжений и сейсмодеконических деформаций: методические основы, поле современных напряжений Юго-Восточной Азии и Океании // *Доклады РАН*. 1997. Т. 354, № 1. С. 101–104.

Delvaux D., Sperner B. New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program // *New Insights into Structural Interpretation and Modelling*, Geological Society / ed. Nieuwland D. A. London : Special Publications, 2000. P. 75–100.

Yamaji A. The Multiple Inverse Method: A new technique to separate stresses from heterogeneous fault-slip data // *Journal of Structural Geology*. 2000. Vol. 22, N 4. P. 441–452.

Thakur P., Srivastava D. C., Gupta P. K. HGA: A genetic algorithm method for direct estimation of paleostress states from heterogeneous fault-slip data // *Journal of Structural Geology*. 2020. Vol. 138. P. 104084.

# О ГЛУБИНЕ ПРОНИКНОВЕНИЯ ОТКРЫТЫХ РАСКОЛОВ И ТРЕЩИН НОВЕЙШЕГО ВРЕМЕНИ НА КОЛЬСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ (ФЕННОСКАНДИНАВСКИЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ ЩИТ)

**А. А. Никонов**

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

При исследованиях по теме «разломообразование», будь то оживление разломов древних или возникновение в связи с сильными землетрясениями свежих, одной из важнейших задач является установление глубины проникновения растрескивания и/или расщеления в породы фундамента. Как правило, искомая величина не устанавливается визуально, а геофизические работы не проводятся. В статье использован побочный способ на примерах из СВ части Фенноскандии, где теперь установлено немало сильных древних землетрясений, в том числе в историческое время.

До сих пор оставались недооцененными в должной мере с точки зрения разломной тектоники давние сведения о глубинах нахождения в трещинах коры выветривания на Кольском п-ове [Никонов, 1969]. В западной части Мурманской области и в соседней части Финляндии на шести участках, разнесенных на 200 км по долготе и на 150 км по широте, на абс. высотах от –30 до 350 (500) м в скважинах и в карьерах обнаружена кора выветривания в виде раздробленных трещиноватых скальных пород и до дресвяно-глинистой массы. Глубина столь дезинтегрированной породы составляла от 8–20 до 30 (50) м, но по трещинам выветрелые изверженные породы разного состава проникали и до 100 м – в впадине оз. Инари, в горах Саариселька, на возвышенности у г. Ковдор, на борту Туломской депрессии (до 30 м), на склоне Кольской депрессии (до 20 м). При этом отмечалась приуроченность трещин к зонам катаклаза, дробления и иных нарушений.

Представляется логичным принять распространение коры выветривания на 8–20 и до 30–100 м по прежним разломам, зонам дробления, трещиноватости, и не иначе. Так выводится, пока на нескольких участках, но правомерно, и общее представление о раннем заложении линейных тектонических зон в кристаллическом фундаменте Фенноскандинавского щита, которые служили «прологом» доледниковых долин [Там же] и активизации древних разломов (с мощными землетрясениями) в разные эпохи четвертичного периода и особенно в эпохи с миграцией по мере дегляциации.

Северная часть Кольского п-ова не единственная, где определяется глубина проникновения в кристаллический фундамент молодых активных разломов и крупных трещин. В Кандалакшском грабене, на южном

обрамлении Кольской глыбы, при проведении разносторонних морских гидро- и геофизических исследований установлены водообильные зоны трещиноватости в основном до глубины 20–50 м в дочетвертичных скальных породах, по разломам сбросового типа. Трещинно-жилльные воды по зонам дробления прослежены до глубин 150–200, реже – до 300 м [Рыбалко, Корнеев, 2014]. К западу от Кандалакшского грабена в котлованах под сооружениями Князегубской ГЭС выявлена густая сеть трещин с полостями, уходящими в скальные породы фундамента, что ранее при бурении не обнаруживалось [Ломтадзе, 1965].

На все эти факты не обращалось внимания тектонистами, но теперь резонно считать их гораздо более распространенными и значимыми для познания молодой тектоники, сеймотектоники, сейсмического потенциала и опасности, ибо в регионе установлены мощные сейсмогенные зоны и сильные землетрясения исторического и доисторического времени [Николаева, Никонов, Шварев, 2019].

#### **Литература**

Никонов А. А. О коре выветривания Кольского полуострова // Известия АН СССР. Серия: География. 1969. № 2. С. 101–107.

Рыбалко А. Е., Корнеев О. Ю. Проблемы гидрометеорологического обеспечения рационального природопользования и экологической безопасности Арктической зоны Российской Федерации // Российские полярные исследования. 2014. № 1 (15). С. 7–16.

Ломтадзе А. М. Инженерно-геологические условия Князегубской ГЭС. 1965. С. 67–72.

Николаева С. Б., Никонов А. А., Шварев С. В. Поздне- и послеледниковые разломы и палеосейсмонарушения в восточной части Фенноскандинавского щита: обзор и результаты исследований // Труды Фермановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2019. 16. С. 428–432.

## **ДЕСТРУКЦИЯ ЛИТОСФЕРЫ ЮГА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ**

**А. М. Пашевин, А. А. Субботин, Н. А. Литвинов**

Иркутское геофизическое подразделение АО «Росгеология»

г. Иркутск, Россия

[ampashev@yandex.ru](mailto:ampashev@yandex.ru)

В докладе рассматриваются особенности строения осадочного чехла и фундамента в южной и юго-восточной области консолидированной платформы. При этом основное внимание уделяется строению Предплатомского прогиба, который в настоящее время активно изучается комплексом геофизических методов, в том числе электромагнитными зондированиями (ЗСБ и МТЗ).

В частности, на северо-востоке прогиба (Березовская впадина) выявлена зона деструкции верхней части земной коры, которая распространяется на глубину порядка 20 км, где она сопрягается с субгоризон-

тальным слоем пониженного сопротивления. Последний широко распространен на континентах и известен как литосферный проводящий слой (ЛПС). ЛПС представлен глубокометаморфизированными структурно-вещественными комплексами, имеет относительно выдержанную толщину и глубинное положение. В его подошве, по-видимому, фиксируется поверхность Мохоровичича (на глубине порядка 40 км).

В пределах ЛПС глубинными сейсмическими зондированиями (ГСЗ) зафиксированы скоростные аномалии, а магнитотеллурическими зондированиями аномалии электрической проводимости. Отмечается совпадение аномалий проводимости с понижением скорости распространения волн на 200–400 м/с. В подошве слоя скорость возрастает до 8,2–8,4 км/с. ЛПС, вероятно, является местом локализации и источником преобразования флюида мантийного происхождения. При этом поступающий в аномальную зону глубинный высокотемпературный закритический флюид лишь усиливает деструкцию земной коры.

Возможно, зона деструкции земной коры образовалась вследствие тектонической коллизии консолидированной платформы и Патомского нагорья. Свидетельством тектонического напряжения на этом участке являются происходящие здесь землетрясения (8–10 класса). Таким образом, зону деструкции фундамента можно рассматривать как анизотропную флюидогенерирующую и флюидосодержащую, т. е. флюидодинамическую систему, выраженную в виде очагов и горизонтов аномальной трещиноватости. При этом интенсивность трещинообразования, спорадически развитая в нижней части осадочного чехла, дискретно – в виде довольно значительных ареалов – распространяется на большие глубины в фундаменте. Однако на больших глубинах (более 30–40 км), где субстрат земной коры находится в пластичном режиме, трещины затухают.

Выделенная область, вероятно, является областью активного преобразования черносланцевых нефтематеринских пород, а также возможной зоной транзита углеводородов из глубоких горизонтов. Отметим, что глубинный высокоактивный флюид интенсивно взаимодействует с базальными горизонтами рифея и венда. Здесь, очевидно, могут происходить процессы выщелачивания, перекристаллизация и улучшение коллаторских свойств осадочных горных пород. Мощная проработка отложений высокотемпературными гидротермальными растворами, по-видимому, увеличивает скорость генерации УВ в нефтематеринских породах, что повышает перспективы территории на обнаружение залежей нефти и газа в Предпатомском прогибе.

## МОРФОЛОГИЯ НАДВИГОВОЙ ЗОНЫ СЕВЕРНОГО ФАСА АЛТАЯ

С. Г. Платонова<sup>1</sup>, В. В. Скрипко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт водных и экологических проблем СО РАН  
г. Барнаул, Россия

<sup>2</sup> Алтайский государственный университет, г. Барнаул, Россия  
sgplatonova@mail.ru

Северная граница гор Алтая и Западно-Сибирской равнины выражена в рельефе на протяжении почти 170 км четким уступом, названным В. А. Обручевым в 1915 г. «фасом Алтая» и представляющим собой систему взбросо-надвигов. Надвиговое строение фаса выделено впервые по геологическим данным [Чернов, 1965] в районе города-курорта Белокуриха. Этот уступ состоит из сочетаний прямолинейных и дугообразных отрезков. Высота уступа составляет в основном 80–200 м, на востоке она местами возрастает до 300–540 м, на западе снижается до 80–100 м [Лоскутов, 2002].

Вопрос о морфологической выраженности надвиговой зоны на поверхности встал, когда было установлено надвижение пермских гранитов на собственную кору выветривания в 11 км южнее фаса. Анализ показал, что представленные на линии Белокуриха – Быстрый Исток на протяжении почти 40 км от фаса к северу широтно ориентированные предалтайские увалы (Камышинский, Ануйский, Колыванский) по характерной асимметричной форме, расстоянию между валами морфологически аналогичны зонам надвигов модельных территорий. «Четкая инверсия современного рельефа по отношению к рельефу фундамента», выделенная А. М. Малолетко [1972, с. 160], в иной интерпретации положения поверхности фундамента, по-видимому, представляет собой проявление надвигов тылового-чешуйчатого типа [по Boyer, Elliott, 1982]. Общую картину дополняет наличие еще одного обязательного элемента надвиговых зон – тылового шва, контролирующего симметричное изменение направления течения рек Чарыш, Ануй, Песчаной при выходе с гор с меридионального на субширотное. Морфологической выраженностью надвиговой зоны можно считать и тройной ряд более мелких увалов на протяжении 2 км к северу от фаса в междуречье руч. Согорного и р. Березовки.

Основные ключевые моменты, почему не было установлено морфологической выраженности надвиговой зоны предгорий: 1) модели надвиговых систем отработаны в основном для пластичных мезозоид, а не для «хрупких» алтайских блоков земной коры; 2) сложность выделения реперов для выделения этапов миграции разрывов надвиговой системы в течение длительного Новейшего времени (то, что они перемещались с севера на юг, отмечено в палеореконструкциях А. М. Малолетко [1972] и

О. М. Адаменко [1974]); 3) положение в современной предгорной зоне, для которой характерны наиболее высокие скорости эрозивно-денудационных процессов в течение всего плейстоцена, затушевывающие тектонически обусловленные формы рельефа.

#### Литература

Чернов Г. А. Геологическое строение и тектоника Белокурихинского массива и месторождения термальных вод : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Новосибирск, 1965. 22 с.

Лоскутов Ю. И. О природе Фаса Алтая // Геоморфология гор и предгорий : материалы Всерос. школы-семинара. Барнаул : Изд-во Алт. гос. ун-та, 2002. С. 142–148.

Малолетко А. М. Палеогеография Предалтайской части Западной Сибири в мезозое и кайнозое. Томск : Изд-во Том. ун-та, 1972. 228 с.

Boyer S., Elliott D. Thrust Systems // American Association of Petroleum Geologists Bulletin. 1982. Vol. 66. P. 1196–1230. <https://doi.org/10.1306/03B5A77D-16D1-11D7-8645000102C1865D>.

Адаменко О. М. Предалтайская впадина и проблемы формирования предгорных опусканий. Новосибирск : Наука. Сиб. Отд-ние, 1976. 183 с.

## ПРОНИКНОВЕНИЕ ВОДЫ ЮЖНОГО БАЙКАЛА В СЕЙСМОАКТИВНЫЕ БЕРЕГОВЫЕ РАЗЛОМЫ: ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИЙ РАСПЛАВНОГО СЭНДВИЧА МИЛОНИТОВ ГЛАВНОГО САЯНСКОГО РАЗЛОМА ПО ИЗОТОПАМ U и Sr

С. В. Рассказов<sup>1,2</sup>, Е. П. Чебыкин<sup>1,3</sup>, А. М. Ильясова<sup>1</sup>, И.  
С. Чувашова<sup>1,2</sup>, С. В. Снопков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия  
rassk@crust.irk.ru

На диаграмме отношения активностей  $^{234}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  (ОА4/8) –  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  состав воды опорной скважины ст. 27 Култукского сейсмопрогностического полигона (Школа) обозначает конечный компонент E (endmember of U in secular equilibrium) с интегрированным во времени максимальным значением ОА4/8 (около 3,3) и минимальным  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (0,70534). Другие станции показывают составы смешения компонента E с компонентом NE (endmember of non-equilibrated U), который имеет ОА4/8 ~1 при  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,7205$ . Вода поступает на полигоне из милонитов гомогенизированного расплавленного сэндвича милонитов Главного Саянского разлома. Глубинная вода Южно-Байкальского резервуара (ЮБР) соответствует содержанию около 10 % компонента E. U–Sr-изотопная систематика, с одной стороны, дает эталон ЮБР для оценки смешения его вод с подземными водами побережья, с другой стороны, служит чувстви-



тельным индикатором загрязнения поверхностных и прибрежных вод озера, которое выражается в расширении диапазонов концентраций и изотопных отношений U и Sr относительно значения ЮБР.

Анализ временных вариаций ОА4/8 ст. 27 Култукского полигона показал отклик на сильное Селенгинское землетрясение 9 декабря 2020 г., в ходе подготовки которого в течение последних 5 лет содержание  $^{234}\text{U}$  в воде этой станции последовательно возрастало. После землетрясения (10 декабря) концентрация изотопа  $^{234}\text{U}$  (0,86 единицы) не отличалась от предшествующих значений, но через 4 дня (13 декабря) резко возросла до 1,27 единицы. В последующие дни выбросы  $^{234}\text{U}$  повторились, перемежаясь с его низкими концентрациями. Концентрация изотопа  $^{234}\text{U}$  возрастала пропорционально повышению концентрации изотопа  $^{238}\text{U}$  с сохранением значений ОА4/8. Следовательно, уран с сохраняющейся пропорцией  $^{234}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  переходил в воду тектонических микротрещин из радиогенных треков. Процесс извлечения урана определялся возросшей при землетрясении эффективностью обводненных тектонических микротрещин.

Компонент Е показывает самую высокую интегральную деформационную активность ст. 27 на полигоне по ОА4/8, но при истощенном уране треков в промытом источнике на уровне концентрации U других станций полигона. Новообразованными микротрещинами от Селенгинского землетрясения обеспечивались дополнительные треки промывки с возрастанием концентрации U. В 500 м западнее ст. 27 находится ст. 8 (Чертова Гора), вода которой содержит на порядок больше U, чем другие станции при содержании около 6 % компонента Е. Коэффициент  $K = 1*$  этой станции свидетельствует о линейном соотношении компонентов вод ст. 27 и 8. На обеих станциях компонент ЮБР подавлен. Особенность источника воды ст. 8 – аномально низкие значения  $E_h$ , полученные перед Хубсугульским землетрясением 12 января 2021 г. и после него. Эти признаки указывают на смещение максимальной активности микротрещин, вскрывающих радиогенные треки, от ст. 27 к ст. 8.

*Финансирование по крупному проекту 13.1902.21.0033.*

## ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО КАВКАЗА ПО НОВЫМ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

**Е. А. Рогожин<sup>1</sup>, А. В. Горбатиков<sup>1</sup>, М. Ю. Степанова<sup>1</sup>,  
Ю. В. Харазова<sup>1</sup>, Н. В. Андреева<sup>1</sup>, А. Н. Овсяченко<sup>1</sup>,  
А. С. Ларьков<sup>1</sup>, А. И. Сысолин<sup>1</sup>, Чэнь Цзе<sup>2</sup>, Лю Цзяо<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing, China  
eurog@ifz.ru

В период с 2014 по 2019 г. были проведены комплексные геолого-геофизические исследования в крупнейших флексурно-разрывных и разломно-складчатых зонах на Северо-Западном Кавказе (Анапской, Ахтырской, Молдавановской, Карабетовской, Фанагорийской и Приазовской антиклинальных гряд, разломов Пшеха-Адлерского, Керченского пролива, Керчь-Тузлинского). По результатам этих работ удалось в крупнейшей Анапской флексурно-разрывной зоне, а также складчато-разрывных структурах на Таманском полуострове и в Керченском проливе показать их глубинное строение в толще всей земной коры и привязать их к конкретным тектоническим структурам на поверхности. Привязка была осуществлена путем согласования глубинной структуры исследуемого района по материалам профилирования ММЗ и структурно-геологических работ с данными о параметрах разреза осадочного чехла, коровых границ разделов, полученных в результате бурения, сейсморазведки МОВ ОГТ и ранее выполненных работ методом МОВЗ.

Выяснилось, что Анапская флексура имеет под собой четкие глубинные корни, выраженные в виде близвертикальных перемежающихся низкоскоростных и высокоскоростных включений. Эти структуры местами смещают разделы в земной коре и отделяют периклиналь Северо-Западного Кавказа от области Таманского полуострова и Керченского пролива.

Удалось разделить разломы, подстилающиеся в недрах низкоскоростными близвертикальными узкими «карманами» кавказского и транскавказского простирания, на глубинные, проникающие в низы коры и даже в верхи мантии, и приповерхностные, не выходящие за пределы толщи осадочного чехла.

Важными представляются сведения о положении высокодобротных толщ кристаллического фундамента под периклинальным замыканием мегантиклинория и под Таманским полуостровом. Кристаллический фундамент, залегающий на глубинах ниже 10 км под центральной частью мегантиклинория, в западном направлении погружается под низкодобротные отложения Керченско-Таманского прогиба и трассируется под северный шельф Черного моря. Судя по результатам (Акимов и др., 2019 г.) в этом же направлении располагаются эпицентры землетрясений в области Анапской флексурно-разрывной зоны.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты 18-05-00641\_a, 19-55-53017 ГФЕН\_a.*

# ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВАРИАЦИЙ РАДОНА В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ ЮЖНОГО ПРИБАЙКАЛЬЯ ПОД ВЛИЯНИЕМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

А. К. Семинский, К. Ж. Семинский

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

Исследования вариаций радона в периоды сейсмической активности представляют научный интерес, который на начальных этапах работ связан с выявлением общих закономерностей, что в перспективе позволяет рассчитывать на обнаружение краткосрочных предвестников сильных землетрясений. Подобные исследования актуальны для Южного Прибайкалья как наиболее урбанизированной территории в пределах Байкальского региона, характеризующегося сложной тектонической обстановкой и повышенной сейсмичностью.

Эманационный мониторинг подземных вод начат на данной территории в 2012 г. в рамках широкомасштабного исследования пространственно-временных флуктуаций радонового поля. В опорную сеть опробования входят 8 водоисточников в зоне влияния крупного Ангарского разлома. Отбор проб осуществляется один раз в две недели.

Целью исследований в данном случае было выявление общих закономерностей колебаний концентрации радона ( $Q$ ) в подземных водах под влиянием землетрясений различного энергетического класса ( $K$ ), происходящих в Прибайкалье. Решались следующие задачи: 1) проведение детальных режимных наблюдений в течение нескольких месяцев 2020 г., направленных на получение количественных характеристик взаимосвязи сейсмической активности в регионе с концентрацией радона, растворенного в подземных водах; 2) исследование полученных массивов данных с помощью методов математической статистики; 3) анализ пространственного положения очагов наиболее сильных сейсмических событий относительно пунктов опробования с эманационным откликом.

Проведенное исследование позволило получить следующие результаты. Во-первых, вследствие проведения детальных (ежедневных) режимных наблюдений создан массив числовых характеристик флуктуаций концентрации растворенного радона в базовом из исследованных водоисточников. Во-вторых, на основе корреляционного анализа уточнены полученные ранее [Семинский, Семинский, 2020] показатели взаимосвязи параметров  $Q$  и  $K$ . Низкий коэффициент корреляции между ними, усредненный по восьми источникам за период девятилетнего мониторинга ( $r = -0,06$ ), не позволяет однозначно определить характер зависимости. В то же время для половины пунктов опробования данный параметр может достигать  $-0,28$ , что, согласно существующим критериям,

означает наличие слабой обратной связи. В-третьих, выявлено умеренное ( $r = 0,392$ ) прямое влияние сейсмичности на последующие всплески радоновой активности, проявляющиеся в пределах четырех суток после землетрясения. Данная закономерность прослеживается большую часть года, но иногда затушевывается под воздействием паводков, о чем свидетельствуют нулевые или отрицательные значения корреляции. В-четвертых, эмпирически определена зона эманационного отклика наиболее сильных землетрясений, произошедших на территории Байкальского региона в 2018–2020 гг. Ее фактические размеры на десятки километров превысили значения, полученные по результатам теоретических построений [Long range gas-geochemical ... , 2011].

#### **Литература**

Семинский А. К., Семинский К. Ж. Предварительные результаты исследования взаимосвязи сейсмической активности с концентрацией радона в подземных водах Южного Приангарья // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2020. Т. 33. С. 100–111. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.33.100>

Long range gas-geochemical anomalies of a remote earthquake recorded simultaneously at distant monitoring stations in India / С. Hirok, B. Waseem, I. Naseer, K. Rakaesh, G. Debasis, S. Prasanta, S. Bikash // Geochemical Journal. 2011. Vol. 45. P. 137–156.

## **ГЛУБИННОЕ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ АНГАРСКОГО РАЗЛОМА ПО НОВЕЙШИМ ДАННЫМ МТЗ**

**И. К. Семинский, А. В. Поспеев**

Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

[iks@crust.irk.ru](mailto:iks@crust.irk.ru)

Байкальская рифтовая зона – интереснейший структурный элемент литосферы планеты, располагающийся в области сочленения Европейской и Азиатской тектонических плит. Зона представляет собой вытянутую на 2500 км область впадин и сопряженных с ними поднятий. Впадина оз. Байкал – ключевой элемент рифтовой системы, глубина погружения кристаллического ложа которого, перекрытого осадками кайнозойского возраста, составляет около 6–7 км (в глубоководной части). В зоне впадины установлены аномальные значения теплового потока, значительно превышающие нормальный уровень значений для Сибирского кратона. Для Байкальской зоны характерно региональное понижение напряженности гравитационного и магнитного полей. Сама Байкальская впадина выделяется интенсивным минимумом силы тяжести и характеризуется аномалией Буге в центральной части. Изучение строения Байкальской рифтовой зоны связано с именами Н. А. Флоренсова, Н. А. Логачева, С. В. Крылова и многих других известных российских специалистов [Флоренсов, 1968], а также ряда зарубежных исследователей [Petit, Deverchere, 2006].

Уровень изученности региона глубинной электроразведкой, производимой современными цифровыми станциями, крайне низкий. В частности, это точечные зондирования становлением поля в ближней зоне в Приольхонье [Кожевников, 1998] и два профиля магнитотеллурических зондирований в центральной части рифтовой зоны [Межблоковые зоны в земной ... , 2013].

Иными словами, исторически сложилась парадоксальная ситуация. Одна из самых интересных геологических провинций России, которая многие годы являлась опытным полигоном отечественной геоэлектрики, до сих пор не обеспечена достаточно надежной геоэлектрической моделью, реализующей современные возможности магнитотеллурики. Вместе с тем именно магнитотеллурика могла бы дать информацию о флюидном режиме литосферы и зонах дегидратации и частичного плавления, столь необходимую во все еще продолжающейся дискуссии о строении Байкальского рифта.

На основании сказанного выше очевидна актуальность проведения большой работы по увеличению объема глубинных электромагнитных зондирований. В настоящей работе освещаются первые результаты новейших магнитотеллурических исследований, направленных на составление геолого-геоэлектрической модели Байкальского рифта, в частности крупнейшей Ангарской разломной зоны в южной части рифта.

Исследования МТЗ в объеме 12 физических наблюдений производились с шагом в 2 км по перпендикулярно пересекающему Ангарский разлом трансекту (ориентировка: З-В). При производстве полевых работ использовались цифровые канадские станции Phoenix Geophysics MTU-5A, регистрировались четыре компонента электромагнитного поля земли ( $E_x$ ,  $E_y$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ ).

#### **Литература**

Флоренсов Н. А. Байкальская рифтовая зона и некоторые задачи ее изучения // Байкальский рифт. М. : Наука. 1968. С. 40–56.

Petit C., Deverchere J. Structure and evolution of the Baikal rift: a synthesis // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2006. Vol. 7, N 11.

Кожевников Н. О. Некоторые особенности структуры Приольхонья по данным электроразведки (Западное Прибайкалье) // *Геология и геофизика*. 1998. Т. 39, № 2. С. 271–276.

Межблоковые зоны в земной коре юга Восточной Сибири: тектонофизическая интерпретация геолого-геофизических данных / К. Ж. Семинский, Н. О. Кожевников, А. С. Черемных, Е. В. Поспеева, А. А. Бобров, В. В. Оленченко, Р. М. Зарипов // *Геодинамика и тектонофизика*. 2013. Т. 4, № 3.

## **О РИФТОГЕНЕЗЕ ХРЕБТА ГАККЕЛЯ НА ЛАПТЕВОМОРСКОМ КОНТИНЕНТАЛЬНОМ СКЛОНЕ**

**Л. А. Сим, Н. А. Гордеев**

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

Авторами проведено исследование напряженного состояния северо-восточной окраины Сибирской платформы. Были обнаружены ярко выраженные самостоятельные внутриплатформенные источники тектонических напряжений в пределах Оленекского и Мунского поднятий, формирующихся в поле напряжений с радиально расходящимися горизонтальными ориентировками осей сжатия. Это может свидетельствовать о воздействии собственных источников новейшего и современного поля напряжения в результате разрядки напряжений сжатия, в котором структуры находились длительное время на глубине. При длительном непрерывающемся воздымании структур за палеозой-кайнозой разрядка напряжений сжатия приводит к радиальной ориентации осей сжатия в горизонтальной плоскости. На севере района в пределах Лаптевоморского побережья восстановлено большое количество локальных стресс-состояний с ориентировкой оси сжатия северо-восточного простирания, что позволило выдвинуть гипотезу о влиянии на напряженное состояние изучаемой части континента арктического спрединга. В настоящем исследовании внесены коррективы в выдвинутую гипотезу. Установлено несколько признаков отсутствия влияния арктического спрединга на напряженное состояние новейших структур. Это комплекс геолого-геофизических разрезов и результаты тектонофизических исследований. Развитие разрывных нарушений и сейсмичность экспоненциально затухает в направлении хребет Гаккеля – Сибирская платформа. Механизмы очагов землетрясений указывают на наличие резкого изменения структурного плана на перегибе шельф моря Лаптевых – прибрежная зона Сибирской платформы. Под прибрежной зоной по геолого-геофизическим разрезам наблюдается крупная вытянутая дугообразная антиклиналь, образующая тектонический вал, отсекающий континентальную область от влияния раскрытия такой крупной структуры, как хребет Гаккеля. Механизмы очагов землетрясений (МОЗ) в рассматриваемом регионе делятся на две группы: сбросовые на океанической и шельфовой частях и сдвиговые – на континентальной. Восстановленные сдвиговые тектонические напряжения на континенте хорошо коррелируют с распределением сдвиговых МОЗ. В области развития ступенеобразных поднятий на прибрежной зоне преобладают северо-восточные ориентировки главных осей сжатия, маркируя унаследованное развитие тектонического вала. Ближе к шельфовой части проявляются северо-

западные ориентировки главных осей сжатия, которые коррелируются с ориентировками осей сжатия механизмов очагов современной сейсмичности. Их следует отнести к локальным стресс-состояниям второго ранга, так как это единичные элементы, выбивающиеся из общего тренда. Таким образом, на континентальной части господствуют напряжения, вызванные внутриплитными источниками. Глобальная структура спрединга ограничивается воздействием на шельф моря Лаптевых, далее на континенте образуется лишь диффузная граница между Евразийской и Северо-Американской литосферными плитами. Характер такой границы может быть обусловлен близостью полюса вращения между указанными плитами, который попадает в площадь проведенных исследований.

## **НЕКОТОРЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ РАЗДРОБЛЕННОСТИ ВЕРХНЕЙ КОРЫ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ И ЕЕ ОКРУЖЕНИЯ ПО ГРАВИМЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ**

**А. В. Сметанин, А. К. Марченко<sup>1</sup>, И. Н. Марченко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Иркутское геофизическое подразделение АО «Росгеология»  
г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> АО «Иркутскгеофизика», г. Иркутск, Россия  
marchenkoak@rusgeology.ru, inmarchenko@rusgeology.ru

В конце 90-х гг. прошлого столетия стечением обстоятельств один из авторов этого доклада впервые познакомился с сотрудниками лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН и ее руководителем Семеном Ийновичем Шерманом. Взаимный интерес представлял количественный анализ размеров геологических блоков, выделяемых по гравиметрическим данным на юге Сибирской платформы. В результате совместной работы выполнено ранжирование объектов по амплитуде аномалий и вычислены их среднегеометрические размеры, вытянутость и распределения этих параметров по площади [Сметанин, Черемных, 2000]. Для развития этого направления впоследствии была разработана методика выделения и анализа одночастных элементов градиентных зон, названных мономерами [Сметанин, 2000]. Авторы этого доклада за последние четыре года усовершенствовали метод до технологии, позволяющей по архивным геофизическим данным количественно охарактеризовать тектоносферу Земли на недоступных для «прямых» наблюдений глубинах. При этом для каждого линейного элемента определяются координаты ( $\varphi$ ,  $\lambda$ ), простирание ( $\alpha$ ), протяженность ( $D$ ), глубина проникновения контакта ( $H$ ) и др. Эти сведения, как и результаты исследований, хранятся и преобразовываются в системе ArcGIS. Для обозначенной территории

получены характеристики мономеров участков, выделенных по геологическим данным. Установлена статистическая прямо пропорциональная связь между значениями глубины проникновения и протяженности контактов, подобная полученным по экспериментальным данным [Разломообразование в литосфере ... , 1992]. Минимальные величины параметров наблюдаются в складчатом южном обрамлении платформы, максимальные – в ее северо-восточной части. При использовании детальных гравиметрических данных появляется возможность выделения более тонких слоев со специфической для них структурой, однако статистическая связь между параметрами сохраняется. Намечилась тенденция к соотношению количества и протяженности мономеров: чем короче линейный элемент, тем чаще он встречается. Полученные данные могут служить обоснованием для создания моделей с дискретной структурой.

#### **Литература**

Сметанин А. В. Черемных А. В. Анализ гравитационных аномалий с целью изучения фундамента юга Сибирской платформы // Геофизика. 2000. № 5. С. 35–39.

Сметанин А. В. Опыт динамической интерпретации гравитационных аномалий. Иркутск, 2000, 86 с.

Разломообразование в литосфере: зоны растяжения / С. И. Шерман [и др.]. Новосибирск : Наука, 1992. 227 с.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИКИ И ТЕКТОНОФИЗИКИ ПРИ РЕШЕНИИ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ**

**С. Н. Тагильцев<sup>1</sup>, А. Е. Лукьянов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Уральский горный университет, г. Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> ПАО «ГМК Норильский никель», г. Санкт-Петербург, Россия  
tagiltsev@k66.ru

В изучении тектонических процессов, происходящих под воздействием природных напряжений, сложились два основных научных направления – геомеханика и тектонофизика. Эти направления имеют много общего в предмете изучения и методах анализа тектонических процессов, существенно дополняют и взаимно обогащают друг друга [Шерман, Днепровский, 1989]. При решении гидрогеологических задач применяются научные подходы обоих направлений. Термин «гидрогеомеханика» в течение нескольких десятилетий используется в гидрогеологии и инженерной геологии [Мироненко, Шестаков, 1974]. Основная идея, лежащая в основе гидрогеомеханики скальных массивов, состоит в том, что напряженное состояние земной коры приводит к формированию в скальных массивах деформационных (тектонических) структур, определяющих их гидрогеологические свойства.



Гидрогеологические свойства скальных массивов в значительной степени обуславливаются наличием и параметрами тектонических нарушений. Обводненные разломы представляют собой самостоятельные гидрогеологические структуры, которые нередко относительно слабо связаны со свойствами породного массива. Факторы, которые определяют гидрогеологические свойства и фильтрационную структуру разломов, можно условно разделить на геологические и геомеханические. Среди геологических факторов необходимо отметить литологический состав пород и возраст разлома. В группу геомеханических факторов следует включить следующие показатели: активизация и образование новых разломов в современном поле напряжений [Тагильцев, 2018]; вид деформации в зоне разлома (хрупкая, переходная, пластичная); строение (структура) тектонической зоны; гидрогеомеханические особенности различных типов разломов.

Основное гидрогеологическое значение имеют тектонические нарушения, которые активны в настоящее геологическое время. Потенциальную активность разломов можно оценить, анализируя их положение в поле современных напряжений. В свою очередь, ориентировка осей главных напряжений может быть определена на основании результатов изучения положения в пространстве тектонических нарушений, особенно водоносных, и систем трещин [Шерман, Днепровский, 1989; Тагильцев, 2018]. При воздействии поля напряжений крылья разлома совершают преобладающие движения в определенном направлении. При пересечении разломов различного кинематического типа происходит их силовое взаимодействие. При этом взаимодействии в зависимости от направления движения по разлому возникают зоны сжатия и растяжения. Наиболее водоносными участками являются зоны растяжения, которые способствуют формированию высоких фильтрационных свойств на локальном участке массива горных пород [Тагильцев, Кибанова, 2017].

#### **Литература**

Шерман С. И., Днепровский Ю. И. Поля напряжений земной коры и геологоструктурные методы их изучения. Новосибирск : Наука, 1989. 158 с.

Мироненко В. А., Шестаков В. М. Основы гидрогеомеханики. М. : Недра, 1974. 266 с.

Тагильцев С. Н. Закономерности пространственного расположения тектонических нарушений в поле современного напряженного состояния земной коры // Горный журнал. Известия вузов. 2018. № 7. С. 52–66.

Тагильцев С. Н., Кибанова Т. Н. Гидрогеомеханические структуры растяжения и сжатия в поле современных тектонических напряжений. // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 7. С. 63–69.

# СОПОСТАВЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ РАЗЛОМНЫХ ЗОН В СЕЙСМОАКТИВНЫХ РЕГИОНАХ

**Е. А. Фаттахов**

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия  
anhair06@gmail.com

Изучение деформационных процессов в сейсмоактивных регионах является важной задачей. Накопленный массив эмпирических данных о современных движениях земной коры позволяет учитывать возникающие деформации при строительстве и эксплуатации особо важных объектов, например, на нефтегазовых месторождениях [Квятковская, Фаттахов, 2019].

В данном исследовании речь пойдет о сопоставлении спектрально-временных характеристик, которые были получены по светодоальномерным и нивелирным измерениям в разломных зонах на Ашхабадском геодинамическом полигоне. Одновременное изучение горизонтальных и вертикальных смещений высокоточными приборами позволяет фиксировать общие закономерности и текущую геодинамическую обстановку в разломных зонах как на границах тектонических плит, так и в отдалении от зоны коллизии [Изюмов, Кузьмин, 2014; Кузьмин, 2008; 2017; 2019; 2021; Кузьмин, Фаттахов, 2016; 2018; Фаттахов, 2017].

Используемые данные были проанализированы на предмет пропусков, выбросов и других помех, которые присущи геофизическим данным [Дещеревский, Сидорин, Фаттахов, 2019]. Построенные периодограммы позволили выявить сезонную компоненту в некоторых рядах и зафиксировать, как ведут себя сигналы в пределах близкого расположения друг к другу и на удалении друг от друга.

## **Литература**

- Квятковская С. С., Фаттахов Е. А. Сравнительный анализ деформационных процессов на подземных хранилищах газа // Проблемы недропользования. 2019. № 4 (23). С. 38–49.
- Изюмов С. Ф., Кузьмин Ю. О. Исследование современных геодинамических процессов в Копетдагском регионе // Физика Земли. 2014. № 6. С. 3–16.
- Кузьмин Ю. О. Проблемные вопросы изучения деформационных процессов в современной геодинамике // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 3. С. 98–107.
- Кузьмин Ю. О. Парадоксы сопоставительного анализа измерений методами наземной и спутниковой геодезии в современной геодинамике // Физика Земли. 2017. № 6. С. 24–39.
- Кузьмин Ю. О., Фаттахов Е. А. Анализ повторных нивелирных наблюдений в зонах разломов методами теории деформаций // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2018. Т. 23. № 4. С. 67–84.
- Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика: от движений земной коры до мониторинга ответственных объектов // Физика Земли. 2019. № 1. С. 78–103.

Кузьмин Ю. О. Геодинамическая эволюция Центральной Азии и современная геодинамика Копетдагского региона (Туркменистан) // Физика Земли. 2021. № 1. С. 144–153.

Кузьмин Ю. О., Фаттахов Е. А. Тензометрический метод анализа результатов наблюдений на геодинамических полигонах // Маркшейдерский вестник. 2016. № 5. С. 74–83.

Фаттахов Е. А. Спектрально-временной анализ светодальномерных наблюдений на Камчатском и Ашхабадском геодинамических полигонах // Вестник СГУГиТ. 2017. Т. 22, № 4. С. 5–17.

Дещеревский А. В., Сидорин А. Я., Фаттахов Е. А. Комплексная методика описания и фильтрации экзогенных эффектов в данных мониторинга, учитывающая вид наблюдений и дефекты экспериментальных данных // Наука и технологические разработки. 2019. Т. 98, № 2. С. 25–60. <https://doi.org/10.21455/std2019.2-2>

## ОТРАЖЕНИЕ РАЗЛОМНЫХ ЗОН ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА В ЕГО ГЛУБИННОЙ СТРУКТУРЕ

**М. А. Хригова<sup>1,2</sup>, В. В. Мордвинова<sup>1</sup>, Е. А. Кобелева<sup>1,2</sup>,  
М. М. Кобелев<sup>1,2</sup>, С. Л. Сеников<sup>3</sup>, З. А. Назарова<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН

г. Петропавловск-Камчатский, Россия

[hritova@crust.irk.ru](mailto:hritova@crust.irk.ru)

Положение полуострова Камчатка в переходной зоне между материком и океаном определяет его сложную глубинную структуру; в частности, формирование глубинной структуры в основном объясняется субдукционным механизмом и деформацией плит в коллизионной зоне [Глубинная модель верхней ... , 2007; Скоростные модели поперечных ... , 2017]. По результатам многочисленных геофизических исследований, выполненных методами сейсмотомографии, геоэлектрики, а также с использованием данных по магнитометрии, гравиметрии и тектонике, исследователями Камчатки сделаны выводы о слоисто-блоковой глубинной структуре полуострова и о различии в строении земной коры и верхней мантии Северной и Южной Камчатки.

В данной работе, выполненной нами методом продольной приемной функции (P-to-S) [Vinnik, 1977; Receiver functions for ... , 1993] по телесеismicким записям станций Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН за период 2011–2013 гг., построен разрез коры и подкоровой мантии под Восточно-Камчатским вулканическим поясом до глубины 80 км. Исследуемый профиль проходит через всю восточную часть полуострова, вдоль разломов Восточно-Камчатской зоны.

На построенном разрезе обнаруживается слоистая структура коры и 45 км подкоровой мантии. Вслед за предшественниками выявленную нами структуру с некоторой натяжкой 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, южнее за Мохо можно принять изолинию 3,9 (поскольку она более пологая). Под большинством сейсмостанций наблюдается сходство глубин выделенной нами границы Мохо с глубинами мощности земной коры на схеме в работе Л. И. Гонтовой и др. [Глубинная модель верхней ... , 2007], что поддерживает данный выбор положения коромантийной границы в полученной нами скоростной модели для Восточно-Камчатского вулканического пояса.

Под сейсмическими станциями Петропавловск и Авача на разрезе наблюдается сложное строение коры, на глубинах 1–30 км обнаруживаются скоростные аномалии, что может являться отражением зоны поперечных глубинных разломов, пересекающих полуостров. Граница между структурами Южной и Северной Камчатки связывается с этой зоной поперечных глубинных разломов, выраженных в современном тектоническом плане в виде Петропавловск-Малкинской зоны поперечных дислокаций [Мороз, Гонтовая, 2018].

В скоростном поле литосферы Восточной Камчатки в интервале глубин ~ 40–60 км четко выделяется слой относительно повышенной скорости, который глубже 60–80 км подстилается слоем пониженных скоростей – астеносферным слоем мантийной литосферы. Данное представление согласуется с томографической моделью, рассчитанной по данным регионального каталога землетрясений КФ ФИЦ ЕГС РАН [Там же].

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках госзадания № 075-01304-20) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».*

#### **Литература**

Глубинная модель верхней мантии Камчатки / Л. И. Гонтовая, В. В. Гордиенко, С. В. Попруженко, И. В. Низкоус // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. № 1, вып. 9. С. 90–104.

Скоростные модели поперечных волн для отдельных районов п-ва Камчатка по кросс-корреляциям сейсмического шума / С. Я. Дрознина [и др.] // Физика Земли. 2017. № 3. С. 23–32.

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.

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, S. W. Roecker // J. Geophys. Res. 1993. Vol. 98, N B3. P. 4437–4448.

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

# УСТАНОВЛЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ДОЛГОСРОЧНЫМИ СКОРОСТЯМИ СМЕЩЕНИЯ ПО СЕГМЕНТАМ ТУНКИНСКОГО РАЗЛОМА И МОРФОМЕТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРИРАЗЛОМНОЙ ЗОНЫ

**А. А. Чеботарев, А. В. Аржанникова, С. Г. Аржанников**

Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия  
Bubda1973@gmail.com

Методика оценки долгосрочных скоростей смещения по активному разлому на основе морфометрического анализа ключевых маркеров (фасеты, дренажные системы) [Height of faceted ... , 2009] была применена для Тункинского разлома (ТР), контролирующего развитие Тункинской системы впадин (ТСВ). В геодинамическом аспекте ТСВ находится в переходной зоне от деформационного режима сжатия Северной Монголии к режиму растяжения, характерному для центральной части Байкальского рифта, что обуславливает особый характер ее развития. Ввиду сложной конфигурации ТР для корректной оценки морфопараметров разлом был разделен на сегменты субширотного, северо-восточного и запад-северо-западного простирания. Совокупный анализ тектонических и геоморфологических маркеров, классически используемых для оценки тектонической активности разлома [Wallace, 1978; Interactions between ... , 2011; Tsimi, Ganas, 2015], показал, что сегменты разлома различного простирания характеризуются различной геоморфологической выраженностью и различными амплитудами и скоростями неотектонических деформаций, зависящих от кинематики смещения. Геоморфологический отклик дренажных систем Тункинского хребта также имеет разные проявления для сегментов разного простирания. По морфометрическим параметрам фасет (угол наклона, высота) и дренажных бассейнов (форма, гипсометрический интеграл, поперечный профиль) они отчетливо разделяются вдоль линии разлома на западную и восточную группы. В целом анализ данных параметров свидетельствует о более высокой тектонической активности западной части Тункинского разлома. Рассчитанные плиоцен-четвертичные вертикальные скорости смещения для различных сегментов Тункинского разлома также подтверждают большую активность западной части разлома. Оценка возраста отдельных геоморфологических структур на основе рассчитанных скоростей смещения предполагает, что начало их опускания по Тункинскому разлому относится к разным периодам времени. Оценка морфометрических параметров фасет и дренажных систем лежачего крыла Тункинского разлома показала, что они развиваются в сингенетической связи: а) с кинематикой смещения по сегментам разлома – различного простирания; б) со скоростью смещения.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ и CNRS (проект 20-55-15002\_НЦНИ / PRC 297213).*

## Литература

Height of faceted spurs, a proxy for determining long-term throw rates on normal faults: Evidence from the North Baikal Rift System, Siberia / C. Petit, B. Meyer, Y. Gunnell, M. Jolivet, V. San'kov, V. Strak, N. Gonga-Saholiariliva // *Tectonics*. 2009b. Vol. 28. TC6010.

Wallace R. E. 1978. Geometry and rates of change of fault-generated range fronts, north central Nevada // *Jour. Research, U. S. Geological Survey*. Vol. 6, N 5. P. 637–650.

Interactions between tectonics and erosion during normal fault growth: Insights from experimental modelling / V. Strak, S. Dominguez, C. Petit, B. Meyer, N. Loget // *Tectonophysics*. 2011. Vol. 513, N 1–4. P. 1–19.

Tsimi C., Ganas A. Using the ASTER global DEM to derive empirical relationships among triangular facet slope, facet height and slip rates along active normal faults // *Geomorphology*. 2015. Vo. 234. P. 171–181.

## ВНУТРЕННЯЯ СТРУКТУРА И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КРУПНЫХ РАЗЛОМНЫХ ЗОН ЮГА ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

**А. В. Черемных**

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

Юг Восточной Сибири представляет собой область сочленения Сибирского кратона и Центрально-Азиатского орогенного пояса. С взаимодействием этих тектонических структур связано формирование сети крупных разломов земной коры. Последние характеризуются длительной историей развития, в ходе которой на фоне изменяющейся во времени ориентировки полей напряжений меняются знаки подвижек по разломам при консервативности их сети [Шерман, 1977]. В результате в зонах долгоживущих разломов наблюдаются остаточные деформации (разрывы) нескольких этапов активизации. Разноранговые разрывы, образующие внутреннюю структуру разломных зон, позволяют реконструировать напряженно-деформированное состояние, характерное для разных этапов тектогенеза.

Исследования проведены на основе метода спецкартирования разломных зон земной коры [Семинский, 2014, 2015]. Изучены парагенезы разноранговых разрывов, реконструированы тектонические напряжения в зонах Приморского, Ольхонского, Бортового, Джиды-Удинского, Северо-Тугнуйского, Северо-Заганского, Хилокского, Чикой-Ингодинского разломов [Межблочные зоны ... , 2013; Черемных, 2015, 2018; Cheremnykh, Burzunova, Dekabryov, 2020]. Во всех разломных зонах установлены два-три различных внешних поля тектонических напряжений, отраженные в парагенезах разрывов. Отчетливо реконструируется поле растяжения с ориентировкой основной оси СЗ–ЮВ. Поле сжатия с СЗ–ЮВ простиранием максимальных субгоризонтальных напряжений в изученных разломных зонах проявлено хуже. Кроме того, для половины изу-

ченных разломных зон выявлено поле сдвига с субмеридиональной ориентировкой оси сжатия и субширотной – оси растяжения. Количественный характер фактического материала и однотипная методика его обработки позволили провести сравнение внутренней структуры и напряженно-деформированного состояния в пределах зон изученных разломов.

#### **Литература**

Семинский К. Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 1: Теоретические основы и принципы // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5, № 2. С. 445–467.

Семинский К. Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 2: Основные этапы и перспективы // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6, № 1. С. 1–43.

Межблоковые зоны в земной коре юга Восточной Сибири: тектонофизическая интерпретация геолого-геофизических данных / К. Ж. Семинский, Н. О. Кожевников, А. В. Черемных, Е. В. Поспеева, А. А. Бобров, В. В. Оленченко, М. А. Тугарина, В. В. Потапов, Р. М. Зарипов, А. С. Черемных // Геодинамика и тектонофизика, 2013. Т. 4, № 3. С. 203–278.

Черемных А. В. Разломы Центрального Прибайкалья: результаты структурно-парагенетического анализа // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7, География. 2015. Вып. 2. С. 59–72.

Черемных А. В. Парагенезы разрывов в крупных разломных зонах Западного Забайкалья // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9, № 3. С. 889–908.

Шерман С. И. Физические закономерности развития разломов земной коры. Новосибирск: Наука. СО, 1977. 102 с.

Cheremnykh A. V., Burzunova Yu. P., Dekabryov I. K. Hierarchic features of stress field in the Baikal region: Case study of the Buguldeika Fault Junction // Journal of Geodynamics. 2020. P. 141–142.

## **РАЗВИТИЕ СТРУКТУРЫ ЮЖНО-БАЙКАЛЬСКОГО БАССЕЙНА ОТ ЭОЦЕНА ДО ПЛЕЙСТОЦЕНА В ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СООТНОШЕНИЯХ СЕДИМЕНТАЦИОННЫХ И ВУЛКАНИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ**

**И. С. Чувашова<sup>1,2</sup>, С. В. Рассказов<sup>1,2</sup>, В. Л. Коломиец<sup>3,4</sup>,  
Р. Ц. Будаев<sup>3</sup>, А. Хассан<sup>1,5</sup>, А. Аль Хамуд<sup>2,6</sup>**

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

<sup>4</sup> Бурятский государственный университет, г. Улан-Удэ, Россия

<sup>5</sup> Университет Аль-Басс, г. Хомс, Сирия

<sup>6</sup> Университет Аль-Фурат, г. Дейр-Эз-Зор, Сирия

chuvashova@crust.irk.ru, rassk@crust.irk.ru

Результаты исследований вулканических пород Камарско-Становой зоны горячей трансенсии (КСЗГТ), расположенной в центральной части позднекайнозойской Байкальской рифтовой системы (БРС), и более древних псевдотахилитов Главного Саянского разлома (ГСР) приводят к выводу о том, что эти породы, геохимически отличающиеся от базальтов

океанических островов (ОИВ), обозначают мантийные и коровые источники (соответственно, с гранатом и без граната), показательные для трассирования комплементарного соотношения слоев коромантийного перехода (КМП). Вулканическая деятельность КСЗГТ 18,1–11,7 млн лет назад связывается с рифтогенным откалыванием фрагмента южного края Сибирского палеоконтинента по Обручевскому разлому и ее угасание – со структурным разьединением Южно-Байкальской впадины и Тункинской долины при растяжении – опускании первой из них и сжатии – поднятии второй. Установленный тектонический контроль магматических источников КМП согласуется с современными деформациями средней – верхней частей коры Южно-Байкальской впадины и сопредельной Тункинской долины, где сильные землетрясения распределяются вдоль Главной Саянской и Приморской шовных границ Сибирского палеоконтинента. И в центральной, и юго-западной частях БРС корово-мантийные источники магм обозначили области взаимного перекрытия деформаций литосферы в Японско-Байкальском геодинамическом коридоре и области Индо-Азиатской конвергенции.

Характер развития Южно-Байкальского бассейна определяется при сравнительном изучении разрезов осадочных отложений Мишихинско-Клюевской палеодолины Танхойской тектонической ступени южного побережья Байкала и палеодолины пра-Манзурка его северо-западного побережья. В опорном Мишихинском разрезе Мишихинско-Клюевской палеодолины определена субсогласная последовательность слоев аллювиальных осадочных отложений от эоцена до нижнего плиоцена. В опорном разрезе Косая Степь-3 палеодолины пра-Манзурка идентифицированы ее наиболее ранние нижнеплиоценовые аллювиальные осадочные отложения. Таким образом, на одной стороне Байкала получили продолжительное развитие однотипные тектонические деформации вплоть до начала плиоцена, на другой его стороне в начале плиоцена образовался сток из оз. Байкал через палеодолину пра-Манзурка, продолжавшийся до начала среднего плейстоцена. Совпадение раннеплиоценовой перестройки рельефа на противоположных берегах Байкала не является случайным, поэтому делается вывод о переломном характере этого рубежа в развитии структуры Южно-Байкальского бассейна и его определяющем значении для быстрого опускания ложа с образованием глубокого Байкала.

*Финансирование по проекту РНФ 18-77-10027.*



### РАЗДЕЛ 3

## ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛОМООБРАЗОВАНИЯ И ДРУГИХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

### ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОКОНТИНЕНТОВ И КРАЕВЫХ ПЛАТО СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ

Г. Д. Агранов<sup>1,2</sup>, Е. П. Дубинин<sup>1</sup>, А. Л. Грохольский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова  
г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Геологический институт РАН, г. Москва, Россия  
Agranovgrisha@gmail.com

Океаническое раскрытие между Гренландией и Европой (образование северной части Северной Атлантики) началось примерно 50–55 млн лет назад после длительного периода рифтогенеза, за которым последовало формирование спредингового хребта Эгир и образование бассейна Норвежской котловины [Insights from the ... , 2012]. В процессе развития региона формировались специфические структуры, к которым прежде всего относятся микроконтиненты и краевые плато, условия формирования которых являются предметом данного исследования.

В пределах Северной Атлантики эти структуры имеют разную морфологию, строение коры и генезис. Наиболее изученными из них являются краевое погруженное плато Воринг и микроконтинент Ян-Майен. Предположительный механизм образования у вышеобозначенных структур сходен. Первоначально, на этапе рифтогенеза, рифтовые трещины формировали зоны перекрытия, после чего подвижный блок, заключенный между ними, начинал деформироваться. В результате этого процесса возможны два исхода: 1) блок не отделяется от одной плиты, и формируется краевое плато; 2) блок полностью отделяется, и образуется микроконтинент. Без каких-то дополнительных допущений второй исход редок, но при наличии горячей точки вероятность данного события сильно возрастает. На примере этих двух структур рассмотрены условия формирования микроконтинентов и краевых плато с помощью физического моделирования.

Моделирование проводилось в лаборатории экспериментальной геодинамики Музея землеведения МГУ. Эксперименты осуществлялись в соответствии с условиями подobia и методиками, описанными в работах [Грохольский, Дубинин, 2006; Шеменда, 1983].

Исследования включали три серии экспериментов:

1) моделирование образования зоны перекрытия при встречном продвижении двух рифтовых трещин;

2) моделирование образования зоны перекрытия под воздействием горячей точки;

3) моделирование образования зоны перекрытия при встречном продвижении двух трещин и функционировании горячей точки после образования зоны перекрытия.

Физическое моделирование образования микроконтинента Ян-Майн и плато Воринг показало хорошее соответствие с предполагаемой эволюцией изучаемых объектов, в котором важную роль играют развитие двух рифтовых трещин, продвигающихся навстречу друг другу, и наличие горячей точки на молодой континентальной окраине.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 18-05-00-378).*

#### **Литература**

Insights from the Jan Mayen system in the Norwegian–Greenland sea–I. Mapping of a microcontinent / G. Peron-Pinvidic, L. Gernigon, C. Gaina, P. Ball // 2012. Geophys. J. Int. V. 191. P. 385–412.

Грохольский А. Л., Дубинин Е. П. Аналоговое моделирование структурообразующих деформаций литосферы в рифтовых зонах срединно-океанических хребтов // Геотектоника. 2006. Т. 1. С. 76–94.

Шеменда А. И. Критерии подobia при механическом моделировании тектонических процессов // Геология и геофизика. 1983. Т. 10. С. 10–19.

## **ПАЛЕОТЕКТОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕЗОЗОЙСКО-КАЙНОЗОЙСКОГО РАЗВИТИЯ ЛОКАЛЬНЫХ СТРУКТУР БУХАРО-ХИВИНСКОЙ НЕФТЕГАЗОНОСНОЙ ОБЛАСТИ**

**Х. Р. Ахмедов<sup>1</sup>, Р. А. Умурзаков<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Каршинский инженерно-экономический институт  
г. Карши, Узбекистан

<sup>2</sup> Ташкентский государственный технический университет  
г. Ташкент, Узбекистан  
axmedov-x-68@mail.ru, umrah@mail.ru

Тектонические критерии нефтегазоносности остаются актуальными и востребованными поисковыми критериями. Анализ публикаций и фондовых источников по использованию тектонических материалов позволяет отметить, что все они опирались на карты (или данные), отражающие суммарное проявление движений и деформаций разных ранговых

составляющих, которые могут иметь различную природу, длительность и разный механизм формирования. Динамические процессы в земной коре (как современные, так и древние) создают весьма сложную картину, которая предстает в виде суммарного облика, требующего детального изучения генезиса на основе тектонофизического подхода. При изучении современных сейсмотектодинамических процессов С. И. Шерман [Sherman, 2016] выделил четыре тектонофизических критерия (формирования очагов землетрясений) – структурный, кинематический, реологический и динамический, которые он считал ядром основных вопросов долгосрочного прогноза землетрясений. Эти показатели связаны с напряженно-деформированным состоянием среды, иерархическая природа которого является доказанным фактом. Эти научные положения применимы и для палеотектодинамических реконструкций в нефтегазовой геологии. Для получения более достоверных и информативных критериев необходимо применение рангового анализа тектонических движений в соответствии с иерархией полей напряжений. Для территории западной части Тянь-Шаня в MZ-KZ истории были выделены различные этапы перестройки полей напряжений [Умурзаков, 2012], которые служат основанием ранжированного анализа особенностей палеотектонических движений и деформаций этих этапов для выявления тектодинамических критериев нефтегазоносных зон.

Для Бухаро-Хивинской нефтегазоносной области были выделены три подобные (в генетическом отношении) ритма первого ранга. В пределах этих интервалов выделены фазы восходящих («активных») и фазы нисходящих («пассивных») тектонических движений. В докладе приводится характеристика полученных для этих интервалов карт амплитуд тектонических движений, карт тектонической активности, которые отражают особенности изменения составляющих первого ранга «активной» и «пассивной» фаз. Выполнен анализ связи этих ранговых показателей с размещением месторождений углеводородов, сделано предложение по использованию их в качестве критериев выделения нефтегазоносных зон.

В целом сформулированы следующие выводы. Палеотектонический анализ формирования структурного плана необходимо проводить с учетом длительности во времени ранговых составляющих тектонических движений. Использование одних только амплитудных карт не позволяет в достаточной мере выявлять информативность тектонических карт, что требует количественных расчетов различных производных от них. Необходимо отказаться от традиционного подхода и перейти к разработке серии (или комплекса) карт, которые бы отражали особенности различных ранговых составляющих движений как в пространстве, так и с учетом длительности проявления их во времени, что позволит получить новые критерии выделения площадей, перспективных на нефть и газ.

#### **Литература**

- Sherman S. I. // *Geodynamics&Tectonophysics*. 2016. Vol. 7, N 4. P. 495–512.  
Умурзаков Р. А. Современные проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов. Бишкек : НС РАН, 2012. Т. 1. С. 127–133.

# ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ СИБИРСКОГО КРАТОНА НА ОСНОВЕ ПРОФИЛЯ «КИМБЕРЛИТ-1980»

А. Ж. Ахметов<sup>1,2</sup>, И. Ю. Смолин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН  
г. Томск, Россия

<sup>2</sup> Томский государственный университет, г. Томск, Россия  
ayan.akhmetov93@gmail.com

По геологическим данным Якутско-Вилюйская крупная изверженная провинция (КИП), Мирнинско-Айхальская седловина и Тунгусская синеклиза, которые находятся на территории Сибирского кратона, существенно различаются как по геологии, так и по развитию в них тектонических процессов. Если в области Мирнинско-Айхальской седловины и Тунгусской синеклизы преобладают деформации сжатий-сдвигов, то на территории Якутско-Вилюйской КИП ярко выражены растяжения-сдвиги, обусловленные влиянием зарождающегося мантийного плюма. В работе проведено численное моделирование геотектонической обстановки в выбранных областях с учетом особенностей их геофизического строения. Проведена оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) на основе расчетов глобальных тектонических течений в Центральной Азии как результата процесса коллизии на границах Евразийской плиты [Макаров, Peryshkin, 2017].

В математической постановке были использованы основные уравнения механики деформируемого твердого тела и определяющие соотношения упругопластической среды с неассоциированной моделью Друкера – Прагера – Николаевского [Николаевский, 1972]. Численное моделирование было проведено на основе конечно-разностного метода Уилкинса. В уравнение состояния системы не были внесены тепловые параметры, влияющие на характер НДС. Поэтому для оценки неявного влияния тепловых эффектов была использована прочностная модель *jelly sandwich*, где принимаются во внимание изменения физико-механических свойств слоев литосферы с учетом теплового влияния мантийного слоя. Граничные условия выбраны индивидуально для каждого из перечисленных геологических объектов. В случае Мирнинско-Айхальской седловины и Тунгусской синеклизы граничные условия соответствуют процессу сжатия, а в случае Якутско-Вилюйской КИП – процессу растяжения. Для более детального исследования НДС указанных геологических объектов были использованы геофизические данные и структурные особенности из профиля «Кимберлит-1981» [Опорные геолого-геофизические ... , 2013].

Результаты, полученные в ходе компьютерного моделирования, позволили заключить, что на территории Якутско-Вилуйской крупной изверженной провинции области локализации неупругой деформации совпадают с районами нахождения залежей нефти и газа. На территории Мирнинско-Айхайской седловины и Тунгусской синеклизы локализация неупругой деформации наблюдается в районах местонахождения залежей алмазов. Полученные результаты могут быть использованы в качестве дополнительных данных при организации и ведении горных работ во время добычи полезных ископаемых.

*Данное научное исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-31-90034.*

#### **Литература**

Makarov P. V., Peryshkin A. Y. Slow motions as inelastic strain autowaves in ductile and brittle media // Physical mesomechanics. Vol. 20, N 2. 2017. P. 209–221.

Николаевский В. Н. Механические свойства грунтов и теория пластичности // Механика твердых деформируемых тел. Т. 6. Итоги науки и техники. М. : ВИНТИ АН СССР, 1972. С. 5–853.

Опорные геолого-геофизические профили России. Глубинные сейсмические разрезы по профилям ГСЗ, отработанным в период с 1972 по 1995 год : атлас СПб. : ВСЕГЕИ, 2013. С. 23–24. URL: <ftp://ftp.vsegei.ru/seism22.pdf>.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ПЕРЕДАЧИ ДЕФОРМАЦИЙ В УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧНОЙ МОДЕЛИ ЛИТОСФЕРЫ**

**С. А. Борняков<sup>1</sup>, И. А. Пантелеев<sup>2</sup>,  
А. А. Каримова<sup>1,3</sup>, Д. В. Салко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, Россия

<sup>3</sup> Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия  
[bornyak@crust.irk.ru](mailto:bornyak@crust.irk.ru)

Под действием тектонических напряжений литосфера деформируется, и этот процесс наиболее интенсивно проявляется в пределах крупных активно развивающихся зон разломов – деструктивных зонах литосферы [Шерман, 1996]. Вопрос механизма пространственной передачи деформаций в масштабно-иерархической разрывно-блоковой структуре таких зон на сегодняшний день остается малоизученным. Наблюдения за пространственной миграцией сейсмичности, электромагнитных и других геофизических полей привели к убеждению, что деформации в литосфере реализуются в том числе в виде медленных деформационных волн (МДВ) [Быков, 2005; Kuz'min, 2012; Шерман, 2013]. Целенаправленных

и системных инструментальных регистраций МДВ не проводилось в силу ряда объективных причин, однако косвенные признаки и теоретические разработки говорят в пользу их участия в деформационной динамике литосферы. Как и с какой частотой возникают МДВ, как они распространяются в зонах крупных разломов с их сложной разрывно-блоковой структурой и в отдельных ненарушенных блоках, способны ли они вызывать тектонические и сейсмические активизации разрывов в этих зонах?

Поиск ответов на эти и другие вопросы осуществлялся с помощью физического моделирования. Выполнено две серии экспериментов на упруговязкопластичном модельном материале как аналоге литосферы, в которых акцент ставился на исследование пространственно-временной динамики деформаций на плановой поверхности нагружаемой модели. В первой серии воспроизводился процесс формирования крупной сдвиговой зоны, во второй серии цельный блок подвергался одностороннему сжатию. Развивающиеся в моделях процессы фотографировались скоростной камерой с последующей обработкой полученных фотографий методом корреляции цифровых изображений. Полученные результаты показали, что пространственная миграция неупругих деформаций как в нарушенной разрывно-блоковой структуре формирующегося разлома, так и цельном ненарушенном блоке реализуется волновым механизмом. Оценены условия возникновения и параметры деформационных волн, показан отклик внутриразломной структуры на их прохождение по зоне разлома. Установлено, что особенности пространственно-временной динамики деформационных волн в зоне разлома и в отдельном ненарушенном блоке зависят от величины накопленных в них напряжений.

*Исследование выполнено при поддержке РФФИ (проект 21-55-53019-ГФЕН).*

#### **Литература**

Шерман С. И. Деструктивные зоны литосферы, их напряженное состояние и сейсмичность // Неотектоника и современная геодинамика континентов и океанов. М., 1996. С. 157–158.

Быков В. Г. Деформационные волны Земли: концепция, наблюдения и модели // Геология и геофизика. 2005. Т. 46, № 11. С. 1176–1190.

Kuz'min Yu. O. Deformation Autowaves in Fault Zones // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2012. Vol. 48, Iss. 1. P. 1–16.

Шерман С. И. Деформационные волны как триггерный механизм сейсмической активности в сейсмических зонах континентальной литосферы // Геодинамика и тектонофизика. 2013. Т. 4, № 2. С. 83–117.

# ОЦЕНКА СКОРОСТЕЙ ПОЗДНЕКАЙНОЗОЙСКИХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ГОРНОГО ОБРАМЛЕНИЯ ВПАДИН БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ СИСТЕМЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭВОЛЮЦИИ РЕЛЬЕФА

**Л. М. Бызов**

Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия  
leo212002@yandex.ru

Рельеф земной поверхности является отражением комплексного воздействия эндогенных и экзогенных процессов, и, таким образом, морфометрические параметры рельефа можно рассматривать в качестве количественных индикаторов этих процессов. В Байкальской рифтовой системе (БРС) такими индикаторами могут служить морфометрические характеристики эскарпментов – крутых приразломных склонов с выраженными тектогенными фасетами трапецевидной или треугольной формы, широко распространенных в обрамлении всех впадин системы [Уфимцев, 1992]. Морфотектонический анализ эскарпментов, приуроченных к разным впадинам, позволил выделить группу объектов, демонстрирующих различные морфометрические параметры (высота и наклон фасет, высота склона, его протяженность и др.) при общем морфологическом подобии. Для выбранных объектов была проведена серия экспериментов по математическому моделированию эволюции рельефа, целью каждого из которых являлось достижение морфометрических характеристик, близких к реальным. В качестве инструмента реконструкции была использована программа CHILD [Tucker, 2011]. Основным граничным условием, принятым в модели, является относительная однородность экзогенных факторов, влияющих на развитие ландшафта, таким образом, морфометрическое разнообразие эскарпментов и их элементов связывается с тектоническими параметрами (скорость поднятия, угол падения разлома и время активизации), а также с геометрией исходной поверхности. В качестве эталонных значений скорости и времени поднятия были приняты данные трекового анализа, полученные для Баргузинского хребта [How old ... , 2009]. В результате моделирования были получены аппроксимированные значения скорости поднятия, характерные для этапа позднекайнозойской активизации, продолжительность которого, по итогам реконструкции, также представляется неодинаковой для различных объектов БРС. Значения скорости поднятия варьируют в диапазоне 0,3–0,5 мм/год, время активизации поднятия для выбранных эскарпментов составило 2–5 млн лет. Анализ результатов моделирования показал устойчивую корреляционную зависимость между модельными параметрами поднятия и морфометрическими показателями рельефа

эскарпментов, что позволяет экстраполировать параметры модели на объекты, характеризующиеся сходными морфометрическими свойствами и оценить скорости вертикальных движений по разломам региона.

#### Литература

Уфимцев Г. Ф. Морфотектоника Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск : Наука, 1992. 216 с.

How old is the Baikal rift zone? Insight from apatite fission track thermochronology / M. Jolivet, T. De Boisgrollier, C. Petit, M. Fournier, V. A. San'kov, J.-C. Ringenbach, L. M. Byzov, A. I. Miroshnichenko, S. N. Kovalenko, S. V. Anisimova // *Tectonics*. 2009. Vol. 28. <https://doi.org/10.1029/2008.TC002404>.

Tucker G. E. CHILD Users' Guide. 2011. URL: [www.csdms.colorado.edu](http://www.csdms.colorado.edu).

## СКВАЖИНА КАК «ОНЛАЙН-СИСТЕМА» ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ТЕСТИРОВАНИЙ

**А. Г. Вахромеев<sup>1,2,3</sup>, С. А. Сверкунов<sup>1,2,3,4</sup>, Р. Х. Акчурин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский филиал ООО «РН-Бурение», г. Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Иркутский научный центр СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>4</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет  
г. Иркутск, Россия  
[dobro\\_75@mail.ru](mailto:dobro_75@mail.ru)

Напряженное состояние проницаемой части природного трещинного резервуара (ПР), флюидонасыщенных пластов-коллекторов может динамически меняться в процессе колебаний барического поля пластовой углеводородной системы при первичном вскрытии пласта. Авторами проведен анализ природно-технической системы «скважина – флюидонасыщенный пласт» как реальной online-модели процесса «утечки» – гидроразрыва пласта (ГРП) на основе стандартного графика зависимости давления от времени при ГРП. Исследование процессов, происходящих в текущий момент бурения в карбонатных каверно-трещинных коллекторах, позволяет осуществлять прогноз реакции массива горных пород при гидравлическом приложении к нему репрессии (т. е. при первичном вскрытии коллектора во время бурения скважин) и депрессии (при проведении работ по испытанию и освоению продуктивной скважины). Любые барические воздействия, гидравлически приложенные к пластовой флюидной системе, способны перевести природный резервуар в другое напряженное состояние. Одно из наиболее сложных – состояние с существенно меняющимися параметрами проницаемости фильтрующих трещин [Боревский, 1986]. Важно понимать, что, если этот переход в процессе бурения является неконтролируемым и непрогнозируемым, на практике можно необратимо и существенно снизить фильтрационно-емкостные



свойства коллектора, а значит, потерять продуктивность скважин по нефти и снизить конечные показатели рентабельности освоения месторождения углеводородов.

Детальный анализ существующих исследований показывает, что при снижении забойного/пластового давления до определенного уровня наступает смыкание трещин и снижается проницаемость в области падения давления [Боревский, 1986; Переходные напряженные состояния ... , 2018; Гидродинамическое моделирование ... , 2011]. При этом, чтобы в дальнейшем снова «раскрыть» эти трещины, недостаточно гидравлически «вернуть» давление на начальные значения, при которых трещины были открыты. Необходимо повысить давление флюидной системы до уровня раскрытия трещины, т. е. до величины  $P_{\text{утечки}}$ .

Подчеркнем, что по результатам геолого-промыслового и технологического сопровождения в цикле первичного вскрытия трещинных ПР одно и то же забойное/пластовое давление флюидной системы в разных напряженных состояниях горного массива может соответствовать совершенно разным состояниям естественных фильтрующих трещин.

Искомым решением может стать раскрытие естественных фильтрующих трещин с последующим их закреплением доступным проппантом (по аналогии с проведением процесса гидроразрыва пласта, но с уже раскрытыми естественными трещинами) [Экспрессный способ закрепления ... 2020; Способ первичного вскрытия, ... , 2015; Способ испытания и освоения ... , 2017].

Сам подход гидравлического воздействия на призабойную зону пласта (ПЗП) в трещинном ПР может реализовываться в области не просто достижимых, а обычных по величине значений репрессии, обычных для бурения скважин нефтяного ряда. При этом последующее снижение величины текущего  $P_{\text{заб}}$  приводит к закреплению проппантом просвета фильтрующих природных трещин (ПТ). В случае поглощения в ПТ в ПЗП закрепленные таким образом ПТ кольматируются на основе известных подходов. Однако в последующем, в циклах очистки трещинного пласта и его исследования на режимах (гидродинамические исследования (ГДИ), испытания) созданием депрессии, смыканию трещин ПЗП препятствует ранее размещенный проппант. В то же время падение давления в призабойной зоне пласта ведет к закреплению проппанта в ПТ в ПЗП.

### **Литература**

Боревский Л. В. Анализ влияния физических деформаций коллекторов на оценку экспл. запасов подземных вод в глубоких водоносных горизонтах // Методы изучения и оценка ресурсов глубоких подземных вод / под ред. С. С. Бондаренко, Г. С. Вартамяна. М. : Недра, 1986. 479 с.

Переходные напряженные состояния горного массива флюидонасыщенных карбонатных коллекторов / А. Г. Вахромеев, С. А. Сверкунов, В. М. Иванишин, Н. В. Мисюркеева, И. В. Буддо // EAGE. СПб., 2018.

Экспрессный способ закрепления естественных и искусственных трещин в призабойной зоне продуктивного пласта в процессе первичного вскрытия горизонтальным, наклонным или вертикальным бурением / Р. Р. Асадуллин, В. М. Иванишин, Р. Х. Акчурин, А. Г. Вахромеев, С. А. Сверкунов ; заявка № 2020132633/059425 от 01.10.2020.

Гидродинамическое моделирование первоочередного участка разработки Юрубчено-Тохомского месторождения с учетом геомеханического эффекта смыкания трещин / Ю. А. Кашников, С. В. Гладышев, Р. К. Рязяпов, А. А. Конторович, Н. Б. Красильникова // Разработка и эксплуатация нефтяных месторождений. 2011. № 4. С. 104–107.

Способ первичного вскрытия бурением горизонтального ствола в трещинном типе нефтегазонасыщенного карбонатного коллектора в условиях аномально-низких пластовых давлений : пат. № 2602437 от 11.09.2015 / А. Г. Вахромеев, С. А. Сверкунов, Р. У. Сираев, Р. К. Рязяпов, А. К. Сотников, К. А. Чернокалов.

Способ испытания и освоения флюидонасыщенного пласта-коллектора трещинного типа (варианты) : пат. № 2657052 от 08.06.2018 / В. М. Иванишин, А. Г. Вахромеев, С. А. Сверкунов, Р. У. Сираев, И. В. Горлов, Ю. В. Ланкин : заявка № 2017114085 (024647) от 21.04.2017.

## **ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В СПРЕДИНГОВЫХ ХРЕБТАХ ИНДИЙСКОГО ОКЕАНА, ПОДВЕРЖЕННЫХ ВЛИЯНИЮ ТЕРМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ**

**Я. А. Данилов, Е. П. Дубинин, А. Л. Грохольский**

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова  
г. Москва, Россия  
srocbocs@yandex.ru

В результате взаимодействия между хребтами и горячими точками изменяются строение и состав океанической коры, а также интенсивность магмаснабжения. Важным фактором, влияющим на характер взаимодействия, является удаленность горячей точки от оси хребта [«Горячие» и «холодные» ... , 2017].

В данной работе рассматриваются спрединговые хребты Индийского океана: ультрамедленный Юго-Западный Индийский хребет (ЮЗИХ) и среднеспрединговый Юго-Восточный Индийский хребет (ЮВИХ).

Эволюция и сегментация восточной части ЮЗИХ происходит под воздействием горячих точек Марион и Крозе. Участки, расположенные в зоне влияния горячих точек, характеризуются отсутствием трансформных разломов на небольших по длине сегментах ЮЗИХ, подверженных наиболее сильному влиянию термических аномалий, а также наличием осевых магматических очагов, что нехарактерно для ультрамедленного спрединга [Кохан, Дубинин, 2020].

На развитие ЮВИХ влияют такие термические аномалии, как горячая точка Амстердам-Сен-Поль (АСП) и плюм Кергелен. Плато АСП в настоящий момент находится практически на оси ЮВИХ. Его венчают

два вулканических острова, которые разделяются осью хребта. Образованное плутом Кергелен одноименное вулканическое плато располагается на расстоянии 1150 км от оси ЮВИХ, однако вследствие своей высокой активности эта термическая аномалия оказывает воздействие на вдольосевую температуру мантии хребта и обуславливает наличие астеносферного потока [Anomalous seafloor ... , 2020].

Для изучения структурообразования в области влияния горячих точек на указанные хребты было проведено физическое моделирование, включающее несколько серий экспериментов.

Серия 1. Моделирование влияния горячей точки АСП на ортогональный спрединг ЮВИХ.

Серия 2. Моделирование взаимодействия горячей точки и трансформного смещения (на примере АСП).

Серия 3. Моделирование структурообразования на спрединговом хребте в условиях раскола вулканического плато горячей точки (на примере АСП).

Серия 4. Моделирование влияния горячей точки Крозе на структурообразование в условиях косоугольного спрединга в пределах ЮЗИХ.

Моделирование показало существенное изменение структурной сегментации рифтовой оси в зоне влияния горячей точки.

*Работа выполнена на кафедре динамической геологии геологического факультета МГУ и в лаборатории физического моделирования геодинамических процессов Музея землеведения МГУ.*

#### **Литература**

«Горячие» и «холодные» зоны Юго-Восточного Индийского хребта и их влияние на особенности его строения и магматизма (численное и физическое моделирование) / Е. П. Дубинин, Ю. И. Галушкин, А. Л. Грохольский, А. В. Кохан, Н. М. Сушевская // Геотектоника. 2017. № 3. С. 3–27.

Кохан В., Дубинин Е. П. Влияние термических аномалий на строение спрединговых хребтов южной части Индийского океана // Материалы ЛП Тектонического совещания. 2020. С. 345–348.

Anomalous seafloor spreading of the Southeast Indian Ridge near the Amsterdam-St. Paul Plateau / Scheirer D. [et al.] // Journal of Geophysical Research. 2000. Vol. 105, N B4. P. 8243–8262.

## **ЖИЛЬНЫЕ ЗАЛЕЖИ УГЛЕВОДОРОДОВ, СВЯЗАННЫЕ С РАЗЛОМАМИ**

**И. Е. Дементьева, В. И. Попков, И. В. Попков**

Кубанский государственный университет, г. Краснодар, Россия  
geoskubsu@mail.ru

Углеводороды (УВ), мигрирующие в разрезе низкопроницаемых пород по зонам разломов, в случае возможности свободной разгрузки на дневную поверхность либо не образуют залежей, либо образуют жильные скопления тяжелых нефтей и битумов. В случае затрудненной вертикальной разгрузки могут возникнуть два варианта формирования залежей. Если избыточное давление в зоне миграции приводит к гидроразрыву какого-либо пласта, УВ имеют возможность латерального проникновения в этот пласт. При этом образуется залежь с весьма сложной морфологией, сочетающей элементы как пластового, так и жильного залегания УВ. Расстояние проникновения в пласт будет зависеть от соотношения величины давления мигрирующих флюидов и сопротивляемости пласта гидроразрыву. Для пластовой части залежи структурный контроль не обязателен. В горизонтах с высокими емкостно-фильтрационными свойствами этот процесс будет затушеван за счет более значительной внутрислоистой миграции УВ от канала миграции. Если же гидроразрыва пластов не происходит, может сформироваться залежь, приуроченная к зоне трещиноватости, сопровождающей разрыв.

Условия, способствующие формированию такого типа залежей УВ, могут существовать в разрезах низкопроницаемых пород, залегающих на любых глубинах, но наиболее характерны для глубины более 4000–4500 м, где низкопроницаемые породы доминируют в разрезе. Вдоль флюидопроводящих разломов здесь могут формироваться протяженные зоны нефтегазонакопления, представленные системой описанных выше типов залежей, в большей или меньшей степени разобщенных между собой или же образующих единую залежь с весьма сложным строением [Попков, 2004; Попков, 2012; Попков, 2013]. Такие зоны нефтегазонакопления с полным основанием можно назвать жильными [Паламарь, Попков, Рабинович, 1981; Попков, 2004], что соответствует как способу их формирования, так и условиям залегания УВ. Глубина насыщения подобных зон будет зависеть от исходной глубины вертикального перетока УВ, их объема и масштаба внутрислоистой разгрузки.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 19-05-00165-а); РФФИ и администрации Краснодарского края (проект 19-45-230005 р\_а).*

## **Литература**

Попков В. И. Жильные зоны нефтегазонакопления: условия образования, строения, методика поисков и разведки // Генезис нефти и газа. М.: Ин-т проблем нефти и газа РАН, 2004. С. 63–72.

Попков В. И. Разломы земной коры: не только каналы миграции, но и зоны аккумуляции нефти и газа // Геология, география и глобальная энергия. 2012. № 3 (46). С. 23–28.

Попков В. И. Тектонический контроль нефтегазоносности глубокопогруженных комплексов // Геология. Известия Отделения наук о Земле и природных ресурсов Академии наук Республики Башкортостан. 2013. № 19. С. 79–83.

Паламарь В. П., Попков В. И., Рабинович А. А. О возможности открытия зон нефтегазонакопления жильного типа // Доклады АН СССР. 1981. Т. 257, № 4. С. 968–970.

## **МЕХАНИЗМ ГЕНЕРАЦИИ И ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МЕЖРАЗЛОМНЫХ АВТОСОЛИТОННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ**

**А. А. Казакбаева, П. В. Макаров, И. Ю. Смолин**

Томский государственный университет, г. Томск, Россия  
aigerim\_@bk.ru

Впервые медленные деформационные возмущения, распространяющиеся в активной геосреде, были открыты как процесс миграции сейсмических активизаций вдоль разломов. В дальнейшем были обнаружены медленные деформационные возмущения, распространяющиеся в геосредах в межразломных областях, такие, например, как миграция максимума сдвиговой деформации со скоростями 20–40 км/год [Ishii, Sato, Takagi, 1980]. Коровые деформации с высокими амплитудами (порядка нескольких миллиметров) и движущиеся с более высокими скоростями были зафиксированы как возмущения, распространяющиеся вдоль Японских островов [Ito, Hashimoto, 2001].

В настоящей работе численно воспроизведен процесс генерации и распространения в модельной среде с несколькими разломами медленных деформационных возмущений неупругой природы. Показано, что межразломные деформационные возмущения генерируются в областях концентрации напряжений на границах разлома как типичные автосолитонные возмущения. Они распространяются в направлении действия максимальных касательных напряжений навстречу приложенной нагрузке (сжатия), разворачиваясь в области более высоких напряжений. Движение таких деформационных автосолитонов сходно с лавированием парусника, движущегося против ветра.

*Работа выполнена в рамках проекта РФФ № 19-17-00122.*

## **Литература**

Ishii H., Sato T., Takagi A. Characteristics of strain migration in the Northeastern Japanese Arc. (II) – Amplitude characteristics // Journal of the Geodetic Society of Japan. 1980. Vol. 26, Iss. 1. P. 17–25.

Ito T., Hashimoto M. Migrating crustal deformation from GEONET observations // AGU Fall Meeting Abstracts. 2001. Abstract G31A-0122.

## ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ РАЗРЫВНОЙ СТРУКТУРЫ СДВИГОВЫХ ЗОН: ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А. А. Каримова<sup>1,2</sup>, С. А. Борняков<sup>1</sup>, И. А. Пантелеев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия,

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, Россия  
tarasova@crust.irk.ru

Крупные зоны разломов являются важными структурными элементами литосферы, контролирующими широкий комплекс генетически связанных с их развитием процессов, в том числе рудогенез и сейсмичность. Закономерности пространственно-временного проявления этих процессов в зонах разломов невозможно выявить без знания основных закономерностей структурно-деформационного развития их внутриразломной разрывной структуры. Структурный аспект этого развития давно является предметом комплексных исследований, и в этом направлении получены фундаментальные результаты, показывающие стадийность развития зон разломов и описывающие характерные для каждой стадии совокупности внутриразломных систем разрывов. Что касается деформационного аспекта с детальным изучением динамики и механизма реализации деформаций, то исследования в этом направлении тематически ограничены и в основном связаны с экспериментальным воспроизведением модели прерывистого скольжения stick-slip.

С целью углубления представлений о динамике деформационного развития зон крупных разломов выполнено физическое моделирование процессов формирования сдвиговых зон в упруговязкопластичных моделях литосферы по методике, изложенной в [Разломообразование в литосфере ... , 1991]. Компьютерная обработка полученных с моделей фотоматериалов проводилась с помощью стандартных графических программ и программным комплексом StrainMaster компании La Vision. На основе анализа и обобщения результатов физического моделирования установлено, что:

– деформационная эволюция внутренней разрывно-блоковой структуры сдвиговой зоны реализуется в виде периодического процесса, представленного разномасштабной временной последовательностью «стадии – этапы – циклы – единичные вариации»;

– протяженные разрывы в сдвиговой зоне имеют сегментную структуру, представленную в каждый момент времени совокупностью чередующихся по их простирацию активных и пассивных сегментов. Активизация пассивных сегментов и переход активных сегментов в пассивное состояние обусловлены разным деформационным поведением смежных блоков. Несогласованность деформационной динамики

смежных блоков порождает разнонаправленную динамику смещений на активных сегментах;

– деформационный процесс в сдвиговой зоне имеет дискретно-волновой характер. Он обусловлен общим перемещением ее активного крыла под действием приложенной к модели нагрузки и периодическим прохождением по ней локализованных фронтов деформаций. Пространственно-временная динамика деформационных волн в сдвиговой зоне определяется степенью развития ее внутренней разрывно-блоковой структуры, уровнем накопленных в ней напряжений.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (21–55–53019–РФФИ–ГФЕН).*

#### **Литература**

Разломообразование в литосфере: зоны сдвига / С. И. Шерман [и др.]. Новосибирск : Наука, 1991. 261 с.

## **АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В РАЗЛОМНЫХ ЗОНАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ**

**Д. К. Кузьмин**

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

Как известно, деформационные последствия длительной разработки месторождений углеводородов приводят к обширным просадкам территории всего месторождения и к локальной деформационной активизации разломных зон [Кузьмин, 2018, 2019а].

В свою очередь, активизация разломов может привести к опасным последствиям [Кузьмин, 2007] и поэтому требует более тщательного анализа и более точного маркшейдерско-геодезического мониторинга. Согласно инструкции по производству маркшейдерских работ РД-07-603-03 в зоне тектонических нарушений реперы должны закладываться через 100 м. Вследствие этого сегодня мы имеем достаточно подробную информацию о тонкой структуре деформационного процесса, которая получена по данным нивелирования вдоль профилей, пересекающих зоны разломов [Кузьмин, 2019б].

В данной работе на базе математического моделирования [Абрамян, Кузьмин, Кузьмин, 2018; Абрамян, Кузьмин, 2019; Кузьмин, 2019; Кузьмин, 2009] исследовано напряженно-деформированное состояние разломных зон. Рассмотрено несколько деформационных моделей разломов, выявлена эффективность их применения на примере месторождений углеводородов. Особое внимание уделено параметрической (инду-

цированной) модели, которая способствует решению крайне актуальной проблемы по обеспечению безопасности объектов нефтегазового комплекса. Кроме того, данная модель позволяет рассчитывать распределение горизонтальных, вертикальных и касательных напряжений в окрестности разлома [Кузьмин, 2020].

*Работа выполнена в рамках госзадания Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН.*

#### **Литература**

- Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика раздвиговых разломов // Физика Земли. 2018. № 6. С. 87–105.
- Кузьмин Ю. О. Индуцированные деформации разломных зон // Физика Земли. 2019а. № 5. С. 61–75.
- Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика разломов и эколого-промышленная безопасность объектов нефтегазового комплекса // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2007. № 1. С. 33–41.
- Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика: от движений земной коры до мониторинга ответственных объектов // Физика Земли. 2019б. № 1. С. 78–103.
- 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.
- Кузьмин Д. К. Сопоставление моделей деформационной активности раздвиговых разломов с результатами геодинамического мониторинга объектов нефтегазового комплекса // Проблемы недропользования. 2019. № 4. С. 18–27.
- Кузьмин Ю. О. Тектонофизика и современная геодинамика // Физика Земли. 2009. № 11. С. 44–60.
- Кузьмин Д. К. Оценка напряженного состояния недр на разрабатываемых месторождениях нефти и газа // Маркшейдерский вестник. 2020. № 5 (138). С. 37–43.

## **ГРАНИТНЫЕ ПРОТРУЗИИ – РАСПРОСТРАНЕННЫЙ ТИП ЗАЛЕЖЕЙ УГЛЕВОДОРОДОВ В КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ФУНДАМЕНТЕ**

**М. Г. Леонов**

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

Граниты слагают до 60–80 % фундамента континентальной земной коры и, помимо того что они сами по себе являются широко востребованным техногенным материалом, служатместищем различных полезных металлических и неметаллических ископаемых, в том числе углеводородов. Поэтому граниты являются объектом горных работ во всем их многообразии (карьеры, подземные выработки, бурение и пр.), и изучение особенностей структуры гранитных тел и их поведения после вхождения в состав консолидированной коры заслуживает безусловного внимания.



На многочисленных примерах установлено, что гранитные массивы после становления в качестве интрузивных тел могут быть подвержены объемной (3D) структурной переработке и интенсивной дезинтеграции. Среди факторов, ответственных за интеграцию гранитов, выделены две группы: 1) факторы, связанные с магматической природой гранитов (прототектонические), – гидротермально-пневматолитовые процессы, контракционная усадка, тектоно-кессонный эффект; 2) факторы, действующие независимо от первичной природы гранитных массивов, в первую очередь тектонические.

Структурная перестройка пород приводит к возникновению дискретной (гранулярной) структуры деформируемых объемов и связана, по образному определению Г. Штилле, с «тектоникой разрыхления». При этом неизбежность структурной дезинтеграции гранитов заложена в их изначальной структуре (относительно крупной зернистости и слабой механической связности зерен) и минеральном составе (кварц-полевошпатовые породы легче других поддаются механической дезинтеграции вследствие разной реакции на изменение *P-T*-режимов при остывании и подъеме в верхние горизонты земной коры).

Объемная дезинтеграция приводит к потере связности и возникновению гранулярной структуры, которая обеспечивает повышение текучести породы и дилатансию породной массы, что способствует интенсификации процессов перемещения горных масс и «внедрению» разбухающих пластифицированных масс в окружающие горизонты с образованием кристаллических протрузий.

Гранитные протрузии широко развиты в различных регионах мира и в разных геодинамических обстановках. В пределах гранитных протрузий зачастую расположены залежи (в том числе гигантские) углеводородного сырья. В настоящее время известно более 450 месторождений нефти в породах фундамента, в том числе гранитного. Порядка ста из них разрабатываются в промышленных масштабах. Месторождения нефти известны в фундаменте платформ (Мид-Континент, США, Северная Африка, Бразилия), молодых плит (Венесуэла, Западная Сибирь), межгорных впадин (Калифорния, Паннонский бассейн, Китай), шельфов окраинных и внутренних морей (Зондский шельф, Северное море) и океанов (шельф Индии). Многие месторождения относятся к уникальным и крупным, и они поставляют  $\approx 15\%$  мировых запасов нефти. Подробный анализ данных по проблеме приведен в [Леонов, Пржиялговский, Лаврушина, 2018].

*Работа выполнена по теме госзадания ФГБУН ГИН РАН при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 16-17-10059).*

#### **Литература**

Леонов М. Г., Пржиялговский Е. С., Лаврушина Е. В. Граниты. Постмагматическая тектоника и углеводородный потенциал. М. : ГЕОС, 2018. 332 с.

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ СДВИГОВОЙ ЗОНЫ ОТ СИСТЕМЫ СКОЛОВ РИДЕЛЯ К МАГИСТРАЛЬНОМУ РАЗЛОМУ

А. С. Лермонтова

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

Сдвиговая зона еще до возникновения в ней магистрального разлома проявляется на поверхности массива так называемыми структурами второго порядка. Последние многократно наблюдались разными исследователями в природных массивах и лабораторных экспериментах. Подробная классификация структур второго порядка приведена в книге [Стоянов, 1977]. В рамках данной работы будут рассматриваться следующие из них: 1)  $L$ -сколы, параллельные направлению основного сдвига в зоне; 2)  $R$ -сколы (сколы Риделя), ориентированные под углом  $\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}$  к направлению основного сдвига в зоне, при правом сдвиге отклоняясь вправо от этого направления, а при левом – влево; 3)  $R'$ -сколы (сопряженные сколы Риделя), ориентированные под углом  $\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}$  к направлению основного сдвига в зоне, отклоняясь в ту же сторону, что и  $R$ -сколы; 4)  $P$ -сколы, ориентированные под углом  $\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}$  к направлению основного сдвига в зоне, при правом сдвиге отклоняясь влево от этого направления, а при левом – вправо.

Сдвиговые эксперименты показывают, что по мере развития сдвиговой зоны в условиях внешнего сжатия зачастую структуры возникают в следующем порядке [Tchalenko, 1968]: 1) сначала почти одновременно появляются  $R$ -сколы и  $R'$ -сколы; 2) затем  $R$ -сколы соединяются с вновь возникающими  $P$ -сколами; 3) наконец, преимущественно в результате некоторого разворота уже существовавших  $R$ - и  $P$ -сколов формируются  $L$ -сколы в направлении основного сдвига, составляющие в дальнейшем магистральный разлом. Примечательно, что описанная закономерность развития зоны сдвига «сколы Риделя –  $P$ -сколы –  $L$ -сколы» встречается на любом масштабном уровне – от микроуровня, когда в экспериментах на сдвиговом приборе (shear box) общая амплитуда сдвига не превышает первых миллиметров, до регионального уровня разломов крупных землетрясений [Tchalenko, 1970]. Что касается природных зон сдвига, то в большинстве случаев их текущее состояние аналогично одной из стадий сдвигового процесса в эксперименте.

Проведено математическое моделирование напряженного состояния массива, содержащего систему сколов Риделя, для разных вариантов взаимного расположения сколов и значений коэффициента внутреннего трения. Расчеты произведены приближенным аналитическим методом [Лермонтова, Ребецкий, 2012], основанным на решении двумерной задачи теории упругости. Показано, что коэффициент внутреннего трения породы значительно влияет на возможность образования магистрального разлома при одинаковом расстоянии между соседними сколами. Результаты моделирования подтверждают предположение о локальном повороте оси максимального сжатия между соседними сколами и позволяют интерпретировать образующиеся *P*-сколы как такие же сколы Риделя, но в локально измененном поле напряжений.

#### **Литература**

- Стоянов С. С. Механизм формирования разрывных зон. М. : Недра, 1977. 144 с.
- Tchalenko J. S., 1968. The evolution of kink-bands and the development of compression textures in sheared clays. *Tectonophysics*. 1968. Vol. 6, Is 2. P. 159–174
- Tchalenko J. S., 1970. Similarities between shear zones of different magnitudes: *Geological Society of America Bulletin*. V. 81. P. 1625–1640.
- Лермонтова А. С., Ребецкий Ю. Л. Исследование взаимодействия трещин сдвига на основе приближенного аналитического решения задачи теории упругости // *Геодинамика и тектонофизика*. 2012. Т. 3, № 3. С. 239–274.

## **АВТОСОЛИТОННАЯ КОНЦЕПЦИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И СЕЙСМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЗЕМНОЙ КОРЕ**

**П. В. Макаров**

Томский государственный университет, г. Томск, Россия  
pvm@ispms.tsc.ru

В работе рассмотрена эволюция взглядов на физическую природу медленных деформационных возмущений, распространяющихся в геосредах, включая миграции сейсмических активизаций вдоль разломов. Отмечены накопившиеся противоречия и явные заблуждения в трактовке физической природы этого явления. Показано, что представление этого явления в терминах классической волновой динамики с оценками длин «волн» и частот некорректно. Также неверна гипотеза о солитонной природе этого явления. Солитоны возбуждаются и распространяются с большими скоростями в консервативных средах. Все их свойства полностью определяются внешними воздействиями. Геосреда и все ее элементы являются нагруженными активными средами, состояние которых часто неравновесно и неустойчиво. В таких активных средах либо спонтанно, либо под воздействиями на границах могут быть сгенерированы автосолитонные возмущения: статические, пульсирующие и бегу-

щие. Все свойства таких автосолитонных возмущений (скорости, амплитуды, особенности взаимодействия) зависят только от свойств среды и никак не зависят от внешнего воздействия на границе. Скорости автосолитонов могут быть сколь угодно малыми.

Предложена и обоснована новая автосолитонная концепция медленных деформационных процессов в геосредах. Эта концепция является непротиворечивой и позволяет с единых позиций объяснить и процессы формирования разломов как стационарных автосолитонов, и процессы миграции деформационной активности в нагруженной геосреде, включая процессы миграции сейсмических активизаций. Показано, что мигрирующие в формирующийся очаг разрушения бегущие автосолитонные возмущения активно участвуют в его формировании, наращивая в нем степень неупругой деформации и/или поврежденности. Бегущие деформационные автосолитонные возмущения могут выступать как триггеры землетрясений.

*Работа выполнена в рамках проекта РФФ № 19-17-00122.*

## **АВТОСОЛИТОННАЯ КОНЦЕПЦИЯ МЕДЛЕННОЙ ДИНАМИКИ В ГЕОСРЕДАХ**

**П. В. Макаров**

Томский государственный университет, г. Томск, Россия  
pvm@ispms.tsc.ru

В природе существует множество различных процессов, которые могут быть объединены термином «медленная динамика». В частности, многие процессы из этого класса представляют автоволновую и автосолитонную динамику. Так как автоволны можно рассматривать как простейшие бегущие автосолитоны, в дальнейшем будем говорить об автосолитонах и автосолитонной динамике. Автосолитоны, как уединенные локализованные возмущения, могут быть сгенерированы в активных средах. Их тип (статические, бегущие, пульсирующие) и свойства (амплитуда, скорость) полностью определяются нелинейными свойствами среды и никак не зависят от возмущений на границе, которые могут привести к локальной потере устойчивости неравновесной системы и возбуждению в ней автоволнового возбуждения. Это их принципиально отличает от солитонов, которые генерируются в консервативных средах и свойства которых полностью определяются этими воздействиями. Все геосреды являются нагруженными, т. е. активными средами. В работе показано, что наблюдаемые в геосредах медленные деформационные возмущения, скорости которых на 5–7 порядков ниже скоростей звука,

являются по своей физической природе автосолидонами. Деформационное автосолитонное возмущение в геосреде представляет собой распространяющееся по нагруженной среде возмущение скорости деформации. К статическим автосолитонам относятся и области разломов как области локализованной деформации и повреждений.

Показано, что бегущие деформационные автосолитоны, взаимодействуя со статическими (разломами), ими поглощаются, наращивая в разломе степень деформации и/или поврежденности. Этот процесс приближает отдельные области разлома к критическому состоянию. По этой причине медленные деформационные автосолитонные возмущения могут быть триггерами землетрясений.

*Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 19-17-00122.*

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЛИТОСФЕРЫ ЯПОНСКОЙ ЗОНЫ СУБДУКЦИИ РЕГИОНА ХОНСЮ ДО И ПОСЛЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ТОХОКУ**

**Д. С. Мягков, Ю. Л. Ребецкий**

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

В данной работе методом численного моделирования изучается вопрос о причинах формирования напряженно-деформированного состояния до события Тохоку 2011 г. и перестройки напряженно-деформированного состояния после события. Районом исследований является литосфера Японской ОД и область сильнейшего землетрясения Тохоку с  $M = 9,0$ , произошедшего в 2011 г. Поиск геодинамического процесса, ответственного за формирование напряженного состояния литосферы Японской зоны субдукции, будет производиться с опорой на данные тектонофизических реконструкций, позволяющих восстановить основные закономерности современного напряженного состояния. Упрощенно говоря, важнейшей особенностью последнего является наличие обстановки горизонтального сжатия в континентальной литосфере и в океанической к западу от желоба и обстановки горизонтального растяжения в океанической литосфере к востоку от тальвега желоба [Ребецкий, Полец, 2014]. Для построения правильной геодинамической модели создается серия моделей с разными источниками формирования напряженно-деформированного состояния (астеносферная конвекция, давление со стороны зоны спрединга и т. д.), результаты моделирования по которым сравниваются с данными по напряженному состоянию [О

генезисе напряжений ... , 2018]. Вторая часть исследования связана с перестройкой напряженного состояния после землетрясения Тохоку. В полученных на первом этапе моделях вводится разрыв, по которому происходит разгрузка, моделируя землетрясение. Итоги моделирования также сравниваются с результатами реконструкций.

Моделирование проводилось по методике, разработанной М. Уилкинсом для исследования упругопластических тел и усовершенствованной Ю. П. Стефановым [Стефанов, 2005] для применения в геомеханике. Особенности данного подхода следующие: применяется явная конечно-разностная схема, причем уравнения движения записываются именно в динамической форме с сохранением инерционного члена, как для реальных динамических задач. Классический подход М. Уилкинса был разработан с ориентацией на применение идеальной пластичности Мизеса. В нашей работе такой подход применяется только для литосферной части мантии, где имеет место дислокационная пластичность. Для коры применяется более сложная схема, предложенная Ю. П. Стефановым. Здесь используется модель Друккера – Прагера – Николаевского, в рамках которой среда рассматривается как упрочняющаяся упругопластическая, принимается неассоциированный закон пластического течения.

#### **Литература**

Ребецкий Ю. Л., Полец А. Ю. Напряженное состояние литосферы Японии перед катастрофическим землетрясением Тохоку 11.03.2011 // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5, Вып. 2. С. 469–506. <https://dx.doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0137>.

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

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

## **ПАЛЕОГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЗОН АНОМАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В РАЗРЕЗЕ АНТИКЛИНАЛЬНЫХ ПЛАТФОРМЕННЫХ СТРУКТУР**

**А. И. Никонов**

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва, Россия  
[nikson59@rambler.ru](mailto:nikson59@rambler.ru)

Разработанная методика палеогеодинамического анализа на основе современного положения стратиграфических поверхностей дает возможность выявить в разрезе поднятия зоны аномальных деформаций горных пород, связанные с разнонаправленными вертикальными движениями блоков фундамента при его формировании [Никонов, 2006].

Они характеризуются разупрочненными вертикальными участками пород в отложениях поднятий. Комплексование геолого-геофизических данных с результатами палеогеодинамического анализа позволяет провести корректировку построения разреза между скважинами и выявить области потенциального изменения фильтрационных параметров коллекторов для обеспечения надежности работы скважин и охраны недр при эксплуатации подземных хранилищ газа и разработке месторождений углеводородов.

Для проведения палеогеодинамического анализа в пределах поднятия необходимо выявить скважину, в которой отложения пород не были подвержены влиянию разнонаправленных вертикальных движений блоков фундамента. Определение местоположения скважины производится методом палеотектонического анализа [Нейман, 1984]. Отметки глубины стратиграфических горизонтов в данной скважине принимаются за нулевые значения по отношению к остальным скважинам, расположенным в пределах поднятия.

Далее выбирается профиль скважин, который пересекает поднятие по длинной или короткой оси, и по нему проводятся вычисления превышений ( $\Delta h$ ) отметок стратиграфической поверхности, определенных в каждой скважине. Результатом вычислений являются значения суммарных накопленных разностей ( $\Sigma\delta\Delta h$ ) отметок стратиграфических горизонтов по профилю. Итогом графических построений являются графики, полученные вычитанием значений  $\Sigma\delta\Delta h$  предыдущей из последующей стратиграфических поверхностей, отражающие их деформацию во времени.

Для определения уровня деформационного воздействия на комплекс пород в пределах поднятия используются представления о геометрической теории деформаций. В данном случае поставленная задача решается независимо от реологического состояния среды (упругого, пластического, вязкого). Иными словами, рассматриваются геометрические характеристики траекторий (морфология) движений поверхности [Кузьмин, 2002].

На основании данных построений в разрезе выявляются зоны, в пределах которых величина относительных деформаций равна или больше значения  $10^{-4}$ , а также временные периоды движения блоков фундамента.

#### **Литература**

Никонов А. И. Роль геодинамических процессов в формировании анизотропии физических свойств пород локальных поднятий // Геология, геофизика и разведка нефтяных и газовых месторождений. 2006. № 12. С. 23–33.

Нейман В. Б. Теория и методика палеотектонического анализа. 3-е изд. перераб. и доп. М.: Недра, 1984. 80 с.

Кузьмин Ю. О. Современная аномальная геодинамика асейсмичных разломных зон // Вестник отделения геологии, геофизики, геохимии и горных наук Российской академии наук. 2002. № 1. С. 1–27.

## **ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРЕРЫВИСТОГО СКОЛЬЖЕНИЯ ПО МОДЕЛЬНОМУ ПРОТЯЖЕННОМУ РАЗЛОМУ**

**И. А. Пантелеев<sup>1</sup>, В. И. Окунев<sup>2</sup>,  
В. А. Новиков<sup>2</sup>, Г. Г. Кочарян<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, Россия

<sup>2</sup> Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия

<sup>3</sup> Институт динамики геосфер РАН, г. Москва, Россия

Настоящая работа посвящена исследованию закономерностей подготовки и реализации прерывистого скольжения по модельному протяженному разлому, а также его инициирования внешними воздействиями различной природы на основе анализа данных акустической эмиссии (АЭ). Для моделирования прерывистого скольжения была использована модифицированная слайдер-модель (ОИВТ РАН), представляющая собой систему из подвижного бетонного блока, скользящего по неподвижному основанию под действием сдвигового усилия, приложенного через жесткую пружину. В качестве заполнителя между подвижным блоком и неподвижным основанием использовался мелкозернистый речной песок. Отличительной особенностью использованного в исследовании подхода от работ отечественных и зарубежных команд являлся размер подвижного блока. Длина блока в 5,6 раза превышала его ширину (длина – 700 мм, ширина – 125 мм), что позволило смоделировать неравномерный контакт блока 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 была использована восьмиканальная система регистрации акустической эмиссии Amsy-6 Vallen (Германия), укомплектованная широкополосными миниатюрными датчиками M-31 Fujicera (Япония) с плоской амплитудно-частотной характеристикой в интервале 300–800 кГц. Датчики крепились на неподвижном основании на цианакрилатный клей симметрично с двух сторон по ходу скольжения блока.

В результате решения задачи локации источников акустической эмиссии при подготовке и реализации динамических подвижек показано формирование зон локализации источников АЭ, установлены закономерности их изменения от подвижки к подвижке. Дополнительно исследованы пространственно-временные закономерности акустической эмиссии при инициировании подвижки инъекцией воды в заполнитель и электрическим током, подаваемым на электроды, расположенные в центральной части подвижного блока.



# ВНУТРИРАЗЛОМНЫЕ АВТОСОЛИТОНЫ. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МИГРАЦИИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО РАЗЛОМУ

**А. Ю. Перышкин, П. В. Макаров**

Томский государственный университет, г. Томск, Россия  
alex700@yandex.ru

После открытия в 1958 г. [Richter, 1958] явления миграции землетрясений по Северо-Анатолийскому разлому (Турция) прошло 62 года. Однако физическая природа этого, как выяснилось впоследствии, повсеместно распространенного явления остается невыясненной. Гипотезы о волновой и солитонной природе этого явления оказались несостоятельными [Makarov, Peryshkin, 2019a, 2019б]. В работах авторов [Makarov, Peryshkin, 2019a, 2019б] предложена и обоснована автосолитонная концепция медленной динамики в нагружаемых, т. е. активных, прочных средах. Согласно этой новой парадигме разломы как узкие протяженные геологические среды с пониженными прочностными характеристиками являются типичными статическими автосолитонами. В этих же исследованиях показано, что в нагружаемых элементах геосред, близких к упругопластическому переходу, в результате потери устойчивости возможна генерация бегущих деформационных автосолитонных возмущений. Согласно общей теории автосолитонов [Кернер, Осипов, 1989] бегущие автосолитонные возмущения при взаимодействии со статическими сливаются с ними, наращивая в них величину возмущения (в данном случае степень деформации или поврежденности). Этот процесс приближает локальные области разлома к критическому состоянию. Эти процессы генерации и эволюции к критическому состоянию деформационных автосолитонных возмущений в геосредах, в частности в зонах разломов, численно изучены в настоящей работе.

Показано, что миграции сейсмических активизаций по разломам являются специфическими процессами взаимодействия бегущих автосолитонных деформационных возмущений со статическими автосолитонами (разломами) с последовательной активизацией в них формирующихся очагов разрушения.

*Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 19-17-00122.*

## **Литература**

- Richter E. F. Elementary Seismology. San Francisco : W. H. Freeman, 1958. 768 p.
- Makarov P. V., Peryshkin A. Yu. Autosoliton model of slow deformation processes in active media // AIP Conference Proceedings. 2019a. Vol. 2167. P. 020210–1–020210–4. <https://doi.org/10.1063/1.5132077>.
- Makarov P. V., Peryshkin A. Yu. Evolution of views on the physical nature of slow deformation disturbances in geomediums // AIP Conference Proceedings. 2019б. Vol. 2167, Iss. 1. P. 020212-1-020212-4. <https://doi.org/10.1063/1.5132077>.
- Кернер Б. С., Осипов В. В. Автосолитоны // Успехи физических наук. 1989. Т. 157. С. 201–266.

## ДЕФОРМАЦИОННЫЕ АВТОСОЛИТОНЫ КАК ТРИГГЕРНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

**А. Ю. Перышкин, П. В. Макаров**

Томский государственный университет, Томск, Россия  
alex700@yandex.ru

Ранее нами было показано, что наблюдаемые медленные деформационные возмущения в геосредах (медленные движения или медленные волны по сложившейся терминологии) по своей физической природе являются автосолитонами [Кернер, Осипов, 1989; Makarov, Peryshkin, 2019a, 2019б]. Также было показано, что зоны разломов как области локализованной деформации и/или повреждений являются типичными статическими автосолитонами. Известно, что различные типы автосолитонных возмущений (электрические импульсы в нервном волокне, химические волны, неравновесные локализованные состояния в газовой и полупроводниковой плазме и т. д.) описываются системами неоднородных уравнений параболического типа. В настоящей работе для моделирования различных типов деформационных автосолитонов в нагруженной (т. е. активной) прочной среде решалась система уравнений МДГТ.

Оказалось, что уравнения МДГТ при определенных условиях описывают также медленную динамику – в данном случае возмущения скорости деформации, которые либо наращивают степень деформации в локальных областях (статические деформационные автосолитоны-разломы), либо распространяются по прочной среде со скоростями на несколько порядков (5–7) ниже скоростей звука. В работе изучены внутриразломные автосолитонные возмущения и особенности взаимодействия бегущих деформационных автосолитонов со статическими – разломами. Показано, что бегущие деформационные автосолитоны могут выступать как триггеры критических состояний, приводя нагружаемый разлом к потере прочности.

*Работа выполнена в рамках проекта РФФ № 19-17-00122.*

### **Литература**

- Кернер Б. С., Осипов В. В. Автосолитоны // Успехи физических наук. 1989. Т. 157. С. 201–266.
- Makarov P. V., Peryshkin A. Yu. Autosoliton model of slow deformation processes in active media // AIP Conference Proceedings. 2019a. Vol. 2167. P. 020210-1–020210-4. <https://doi.org/10.1063/1.5132077>
- Makarov P. V., Peryshkin A. Yu. Evolution of views on the physical nature of slow deformation disturbances in geomediums // AIP Conference Proceedings. 2019б. Vol. 2167(1). P. 020212-1–020212-4. <https://doi.org/10.1063/1.5132077>

## ЛИСТРИЧЕСКИЕ РАЗЛОМЫ И НЕФТЕГАЗОНОСНОСТЬ

**В. И. Попков**

Кубанский государственный университет, г. Краснодар, Россия  
geoskubsu@mail.ru

Листрические разломы и сопровождающие их складчато-надвиговые дислокации являются типичными структурами чехла литосферных плит независимо от их возраста и выступают следствием тектонической расслоенности литосферы. Связано это с тем, что в процессе развития плиты периодически подвергаются воздействию тангенциального стресса, сопровождающегося сокращением их площади за счет как поддвига, тектонического «сдвигания» на окраинах, так и образования внутриплитных дислокаций бокового сжатия [Попков, 1991, 2004].

В зонах внутриплитных дислокаций происходит разрядка глобальных и региональных тектонических напряжений, обуславливающая их высокую сейсмическую активность. В их пределах локализуется высвобождение значительной части механической энергии, осуществляется ее переход в тепловую, резко ускоряются процессы глубинного массопереноса на фоне относительно стабильных смежных участков плит. Высвобождение тепловой энергии, стресс-метаморфизм, тектонодинамические процессы, происходящие в высокоподвижных площадях и носящие импульсивный непрерывно-прерывистый характер, сопровождаются резким увеличением скорости и масштабов генерации углеводородов (УВ), их выделением в свободную фазу, многократно активизируют процессы вертикальной и латеральной миграции флюидов, приводя к формированию зон АВПД и внедрению УВ в коллекторы-ловушки [Попков, 1990, 2007; Попков, Соловьев, Соловьева, 2010]. Основными каналами миграции флюидов являются крупные листрические разломы, связывающие глубинные очаги генерации УВ и верхние горизонты земной коры, включая ее осадочную оболочку [Попков, Соловьев, Соловьева, 2010; Трофимов, 2006]. Намечается достаточно устойчивая связь нефтегазоносных провинций и участков интенсивного выделения энергии, индикаторами которых являются землетрясения [Попков, Соловьев, Соловьева, 2010]. На сейсмических разрезах в зонах разломов можно наблюдать аномалии записи типа «флюидный прорыв» – следы активного массопереноса в земной коре. Таким образом, месторождения УВ представляют трехэлементную систему, включающую залежь, канал, по которому флюиды достигают ловушки, и глубинный очаг, в котором формируются УВ-флюиды.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 19-05-00165-а); РФФИ и администрации Краснодарского края (проект 19-45-230005 p\_a).*

## Литература

- Попков В. И. Тангенциальная тектоника и нефтегазосность Арало-Каспийского региона // Доклады АН СССР. 1990. Т. 313, № 2. С. 420–423.
- Попков В. И. Внутриплитные структуры бокового сжатия // Геотектоника. 1991. № 2. С. 13–27.
- Попков В. И. Стресс-тектоника литосферных плит // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2004. № 4. С. 71–79.
- Попков В. И. Аллохтонные структуры и нефтегазосность литосферных плит // Южно-российский вестник геологии, географии и глобальной энергии. 2007. № 1. С. 35–38.
- Попков В. И., Соловьев В. А., Соловьева Л. П. Грязевой вулканизм, сейсмичность и нефтегазосность // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2010. № 6. С. 27–32.
- Трофимов В. А. Нефтеподводящие каналы, глубинные резервуары и современная подпитка нефтяных месторождений // Генезис углеводородных флюидов и месторождений. М.: ГЕОС, 2006. С. 296–302.

## ТЕКТОНОФИЗИКА И ГЕОМЕХАНИКА В РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ КОЛЛЕКТОРОВ РУДНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ

**Ю. Л. Ребецкий<sup>1</sup>, Ю. П. Стефанов<sup>2</sup>, В. Н. Войтенко<sup>3</sup>,  
Р. А. Бакеев<sup>2</sup>, М. О. Еремин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

<sup>3</sup> ООО «Норильскгеология», г. Норильск, Россия

reb@ifz.ru

Проблема прогноза рудных залежей в зонах разломов с использованием методов геомеханического моделирования напряженно-деформированного состояния начинается с необходимости выбора модели нагружения исследуемого геологического объекта. Правильный путь решения этой проблемы состоит в получении тектонофизическими методами модели напряженного состояния объекта в региональном масштабе усреднения. Далее уже на основе этих данных необходимо осуществить подбор краевых условий, которые, с одной стороны, удовлетворяли бы геологическим данным о соотношениях амплитуд смещений на главных разломах, а с другой – соответствовали бы тектонофизическим данным о напряжениях регионального ранга.

Проблемой геомеханического моделирования в первую очередь является выбор параметров прочности разломных систем и способность учесть в расчетах прямым образом (двухфазные пористые модели) или косвенным образом разупрочняющий эффект флюида в трещинном пространстве не только в пределах разломов, но во всем моделируемом объекте. Этот фактор определяет уровень эффективного изотропного давления, действующего в массиве, что позволяет выполнять вариацию ам-

плитуд внешнего бокового сжатия объекта в более широком диапазоне. Это в свою очередь обуславливает возможность изменения морфологических параметров разрывных структур, формирующихся в закритическом состоянии, что позволяет создать численную модель упругопластического деформирования исследуемого объекта, адекватную природному.

На финальной стадии создания такой геомеханической модели тектонофизика позволяет по данным о напряженном состоянии, возникшем в зонах локализации пластического течения, – эквивалентам зон разломов – сделать прогноз о морфологических параметрах разного типа разрывных структур и их кинематике. Такая интерпретация результатов моделирования должна выполняться с учетом опыта лабораторного тектонофизического моделирования и данных полевых геологических наблюдений.

Сформулированный выше подход в решении задачи прогноза коллекторов, перспективных для формирования рудных залежей, в докладе будет проиллюстрирован на примере геомеханического моделирования Адыча-Тарынской зоны разломов. Расчетная модель имела трехмерную сетку с шагом 500 м, которая была оптимальным образом приближена по строению к исследуемому региону Адыча-Тарынского разлома. Выполнялись исследования роли неоднородности глубинного строения, взаимодействия разломов, начального напряженного состояния, параметров прочности, уровня бокового сжатия. По результатам расчетов были локализованы границы потенциальных структурных дизъюнктивных парагенезов. Установлено, что морфология общей структуры формирующихся разломов осадочного бассейна соответствует цветковой при наличии множества ответвлений, расширяющих зону разлома при его приближении к поверхности.

В глубинном диапазоне 0–4 км от поверхности выполнены специальные исследования особенности мелкомасштабной морфологии цветковых структур, а также в крупномасштабном диапазоне изучались типы разрывных структурных парагенезов, слагающих различные ветви цветковых структур. Высказаны экспертные заключения о возможности интерпретации результатов расчетов для выделения флюидопроводящих зон и структурных ловушек. Проведен сравнительный анализ строения различных участков тектонофизических моделей сдвиговых зон исследуемого региона. Предложены деструктивные участки и узлы, перспективные для формирования рудных полей.

# МЕХАНИЗМЫ ГЕНЕРАЦИИ И СТРУКТУРА ФРОНТОВ БЕГУЩИХ АВТОСОЛИТОНОВ В ДЕФОРМИРУЕМОЙ ПРОЧНОЙ СРЕДЕ

И. Ю. Смолин, П. В. Макаров, В. А. Микушина

Томский государственный университет, г. Томск, Россия  
smolin@ispms.ru

Численно изучен процесс генерации бегущих деформационных автосолитонных возмущений в прочной нагружаемой среде. Ранее было показано [Makarov, Peryshkin, 2019a, 2019b], что фундаментальным свойством такой активной прочной среды, в которой возможна генерация бегущего автосолитонного возмущения, является ее способность некоторое время (время инкубации  $\delta t$ ) переносить перегрузку, т. е. напряжения, несколько превышающие величину упругопластического перехода. Подобная перегрузка приводит к локальной потере устойчивости в среде и релаксации напряжений до равновесного значения, отвечающего величине упругопластического перехода. В среде генерируется автосолитонное возмущение, скорость которого определяется временем инкубации  $\delta t$ , особенностями релаксации и на несколько порядков ниже скорости звука в среде. Этот процесс является процессом самоорганизации в активной среде при ее переходе из одного устойчивого состояния (упругого) в другое устойчивое состояние (пластическое).

Изучена структура фронта сформированного автосолитонного возмущения. Показано, что фронт бегущего вдоль образца деформационного автосолитона ориентирован по направлению максимальных касательных напряжений (приблизительно под углом  $45^\circ$  к оси нагружения), как полоса локализованного сдвига, пересекающая образец от одной границы до другой. Последовательное наращивание таких поперечных полос локализованного сдвига и обеспечивает продвижение фронта автосолитона вдоль оси нагружения образца.

Численно решалась система динамических уравнений механики деформируемого твердого тела с уравнением состояния, записанным в релаксационной форме, обеспечивающей как перегрузку прочной среды, так и последующую релаксацию напряжений за фронтом сформированного деформационного автосолитона.

*Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 19-17-00122.*

## Литература

Makarov P. V., Peryshkin A. Yu. Autosoliton model of slow deformation processes in active media // AIP Conference Proceedings. 2019a. Vol. 2167. P. 020210-1–020210-4.

Makarov P. V., Peryshkin A. Yu. Evolution of views on the physical nature of slow deformation disturbances in geomediums // AIP Conference Proceedings. 2019b. Vol. 2167. P. 020212-1–020212-4.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИКИ И ТЕКТОНОФИЗИКИ ПРИ РЕШЕНИИ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ**

**С. Н. Тагильцев<sup>1</sup>, А. Е. Лукьянов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Уральский горный университет, г. Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> ПАО «ГМК Норильский никель», г. Санкт-Петербург, Россия  
tagiltsev@k66.ru, luk\_alex@inbox.ru

В изучении тектонических процессов, происходящих под воздействием природных напряжений, сложились два основных научных направления – геомеханика и тектонофизика. Эти направления имеют много общего в предмете изучения и в методах анализа тектонических процессов, существенно дополняют и взаимно обогащают друг друга [Шерман, Днепровский, 1989]. При решении гидрогеологических задач используются научные подходы обоих направлений. Термин «гидрогеомеханика» в течение нескольких десятилетий используется в гидрогеологии и инженерной геологии [Мироненко, 1974]. Основная идея, лежащая в основе гидрогеомеханики скальных массивов, состоит в том, что напряженное состояние земной коры приводит к формированию в скальных массивах деформационных (тектонических) структур, определяющих их гидрогеологические свойства.

Гидрогеологические свойства скальных массивов в значительной степени обуславливаются наличием и параметрами тектонических нарушений. Обводненные разломы представляют собой самостоятельные гидрогеологические структуры, которые нередко относительно слабо связаны со свойствами породного массива. Факторы, которые определяют гидрогеологические свойства и фильтрационную структуру разломов, можно условно разделить на геологические и геомеханические. Среди геологических факторов необходимо отметить литологический состав пород и возраст разлома. В группу геомеханических факторов следует включить следующие показатели: активизация и образование новых разломов в современном поле напряжений [Тагильцев, 2018]; вид деформации в зоне разлома (хрупкая, переходная, пластичная); строение (структура) тектонической зоны; гидрогеомеханические особенности различных типов разломов.

Основное гидрогеологическое значение имеют тектонические нарушения, которые активны в настоящее геологическое время. Потенциальную активность разломов можно оценить, анализируя их положение в поле современных напряжений. В свою очередь, ориентировка осей главных напряжений может быть определена на основании результатов изучения положения в пространстве тектонических нарушений, особенно водоносных, и систем трещин [Шерман, Днепровский, 1989; Тагильцев, 2018]. При воздействии поля напряжений крылья разлома

совершают преобладающие движения в определенном направлении. При пересечении разломов различного кинематического типа происходит их силовое взаимодействие. При этом взаимодействии в зависимости от направления движения по разлому возникают зоны сжатия и растяжения. Наиболее водоносными участками являются зоны растяжения, которые способствуют формированию высоких фильтрационных свойств на локальном участке массива горных пород [Тагильцев, Кибанова, 2017].

#### **Литература**

Шерман С. И., Днепровский Ю. И. Поля напряжений земной коры и геолого-структурные методы их изучения. Новосибирск : Наука, 1989. 158 с.

Мироненко В. А., Шестаков В. М. Основы гидрогеомеханики. М. : Недра, 1974. 266 с.

Тагильцев С. Н. Закономерности пространственного расположения тектонических нарушений в поле современного напряженного состояния земной коры // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 7. С. 52–66.

Тагильцев С. Н., Кибанова Т. Н. Гидрогеомеханические структуры растяжения и сжатия в поле современных тектонических напряжений. // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 7. С. 63–69.

## **ВЗАИМОСВЯЗЬ ГРЯЗЕВОГО ВУЛКАНИЗМА С ЗОНАМИ КОНЦЕНТРАЦИИ ДЕФОРМАЦИЙ В КЕРЧЕНСКО-ТАМАНСКОЙ ЗОНЕ**

**Т. Ю. Тверитинова<sup>1</sup>, Д. Е. Белобородов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова  
г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия  
tvertat@yandex.ru

Керченско-Таманская зона (КТЗ) – участок Крымско-Кавказского орогена, занимающий межпериклиналильный поперечный Керченский прогиб, а также ближайшую к периклиналям южную часть предгорного Индоло-Кубанского прогиба с характерным проявлением грязевого вулканизма. КТЗ свойственны новейшие складчатые деформации кайнозойских осадочных комплексов в виде формирующихся в условиях глиняного диапиризма активно развивающихся узких антиклиналей и разделяющих их более широких относительно пассивных синклиналей. Глиняный диапиризм связан с наличием в регионе мощной глинистой толщи майкопской серии олигоцен-миоценового возраста. В северной и центральной частях КТЗ преобладает субширотная ориентировка складок, в южной – северо-восточная. Грязевые вулканы связаны преимущественно с диапировыми антиклиналями, осложняя их в местах пересечения поперечными и диагональными флексурно-разрывными зонами.



Региональный структурно-морфологический анализ распределения диапировых складок и флексурно-разрывных зон указывает на существование в регионе зон концентрации деформаций (ЗКД) различного кинематического типа, включающих диапировые антиклинали как элементы своего внутреннего строения. Главные широтные ЗКД региона отражают их формирование в условиях общего субмеридионального сжатия, выявляемого и в Горнокрымском, и в Больше-Кавказском орогенах. Наряду с широтными ЗКД устанавливается наличие диагональных и субмеридиональных деформационных зон с транспрессивной и трансенсивной кинематикой, обусловленных влиянием структурных планов складчатых орогенов и динамикой их развития в условиях новейших региональных полей напряжений.

Грязевулканические структуры концентрируются в полосе вдоль осевой зоны продолжения орогенов под мощные глинистые толщи майкопа. Их дискретное распределение в этой полосе отражает наличие многочисленных поперечных и диагональных нарушений. Складчатые структуры новейших комплексов в осевой зоне и по наиболее крупным граничным структурам имеют подмайкопские корни. Здесь же расположены наиболее крупные грязевулканические очаги. На уровне майкопской серии в связи с развитием в ней многочисленных пологих субпослойных срывов складчатая структура кайнозойских толщ усложняется с одновременным широким развитием грязевулканических объектов. Грязевулканические объекты представляют собой сложные древовидные постройки, уходящие своими корнями в подмайкопские толщи. Развитие грязевого вулканизма вызывается деформационными процессами формирования входящих в региональную систему структур крупных зон сжатия и сдвига и возникновением при этом глубинных флюидных потоков.

## **ФОРМИРОВАНИЕ ШОВНЫХ ЗОН МЕТЕОР И АЙЛОС ОРКАДОС ПРИ ПЕРЕСКОКЕ ОСИ СПРЕДИНГА В ЮЖНОЙ АТЛАНТИКЕ (ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ)**

**А. И. Толстова, Е. П. Дубинин, А. Л. Грохольский**

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

г. Москва, Россия

tolstova5nastya@gmail.com

В настоящей работе на примере наименее изученной части Южной Атлантики рассмотрена проблема образования южной части Срединно-Атлантического хребта (ЮСАХ), которая сформировалась в результате перескока оси спрединга с палеохребта Агульяс. Перескок оси спрединга

распространен в океанах, происходит это явление из-за изменения поля напряжений и кинематических перестроек. В результате этого процесса мы можем наблюдать в рельефе дна отмерший хребет, новый спрединговый хребет, сформированный на старой океанической литосфере, и две шовные зоны – дальнюю и ближнюю – по отношению к палеохребту. Шовные зоны представляют собой области в океане, которые фиксируют место заложения новой рифтовой зоны и располагаются симметрично относительно новой оси спрединга. Поднятия Метеор и Айлос Оркадос являются примерами таких шовных зон.

Антарктический сектор Южной Атлантики начал раскрываться в результате распада Гондваны около 135–140 млн лет назад (Marks, Stock, 2001). Геофизические исследования предполагают изменение скоростей и направлений перемещения плит, изменения границ плит, сопровождаемые серией перескоков осей спрединга. В области исследования располагается большое количество вулканических поднятий и плато, а также структур более сложного строения.

Изучение условий реорганизации спрединговых хребтов и формирования структур шовных зон проводилось в лаборатории экспериментальной геодинамики Музея земледования МГУ. Цель экспериментов – определить условия кинематической перестройки хребтов, перескока оси спредингового хребта Агульяс и формирования южной части САХ, а также шовных структур Метеор и Айлос Оркадос. Рассматривалась возможность, что реорганизация спрединговых хребтов происходила под влиянием горячих точек.

С учетом особенностей структурообразования в регионе была построена экспериментальная модель эволюции, в которой показано, что кинематическая перестройка спрединговых хребтов 80–60 млн лет назад, вероятно, происходила под влиянием термических аномалий в подлитосферной мантии, расположенных в окрестности Фолклендского плато. Также в процессе перестроек осей спрединга формировались структуры поднятий Метеор и Айлос Оркадос, которые могут заключать в себе блоки континентальной коры. Экспериментально было показано значительное влияние горячих точек на формирование южного сегмента САХ и структур, сопровождающих перескок.

## АНАЛОГОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУР, ФОРМИРУЮЩИХСЯ НА ПЛАТФОРМАХ ПРИ СМЕНЕ РЕЖИМА РАСТЯЖЕНИЯ СДВИГОВЫМ РЕЖИМОМ

**Н. С. Фролова, А. А. Мишакина, А. Н. Корбутяк**

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

Для платформ характерны системы рифтов (авлакогенов, грабен-рифтов), по бортам которых (реже внутри) развиты валообразные поднятия, которые могут быть ловушками углеводородов, поэтому привлекают внимание исследователей. До сих пор имеются различные точки зрения на формирование таких поднятий. На примере севера Западной Сибири было сделано предположение, что валы являются следствием сдвиговых движений по активизировавшимся в новейшее время более ранним разломам, которые ограничивали грабен-рифт триасового возраста [Гончаров, Фролова, 2008]. Ранее нами были проведены многочисленные эксперименты, посвященные закономерностям формирования валов в чехле над прямолинейным разломом фундамента. Цель данной работы – экспериментально показать возможность формирования валов при смене обстановки растяжения обстановкой горизонтального сдвига.

Растяжение моделировалось с помощью двух тонких железных пластин, наложенных друг на друга с перекрытием. Одна из них крепилась к неподвижному борту прибора для тектонофизического моделирования, а вторая к подвижной столешнице. Пластины покрыты шипованным материалом, на который укладывался образец из глины 40%-ной влажности мощностью 5–7 см. При раздвижении ( $v = 10$  см/ч) формировались асимметричные «рифтовые впадины» с проседанием в центральной части и системами листрических сбросов по краям. Ширина рифта во многих опытах менялась вдоль его простирания. Для воспроизведения обстановки простого сдвига железные пластины с моделью рифтовой зоны поворачивались на  $90^\circ$ . Нижняя пластина закреплялась на подвижной столешнице и двигалась вместе с ней, в то время как верхняя пластина оставалась неподвижной. Несколько экспериментов были произведены без заполнения рифтовой впадины для того, чтобы посмотреть развитие разлома, по которому происходит сдвигание на втором этапе. Обычно такой разлом непрямолинеен, поскольку проходит по участкам, максимально нарушенным на предыдущем этапе; он может также переходить с одного борта на другой. Остальные эксперименты осуществлялись с заполнением впадины песком – сухим или со связующими добавками. При сдвигании ( $v = 3$  см/ч) на поверхности образца вначале развивались мелкие трещины отрыва, постепенно объединяющиеся в сколы Риделя,

между которыми формировались валообразные поднятия рор-ур-типа. Сколы не всегда упорядочены, а валы нередко имели разные размеры и неправильную форму, что связано с неровностью формирующегося разлома в основании модели.

Проведенная работа показывает, что при смене обстановки растяжения сдвиговой обстановкой – при благоприятной ориентировке рифтов относительно главных осей сжатия и растяжения – осуществляется сдвигание по сформированным на предыдущем этапе неоднородностям, при этом происходит рост валообразных поднятий. Сдвиговая обстановка в пределах многих платформ на новейшем этапе описана рядом исследователей, а для Западно-Сибирской плиты ее можно считать доказанной. Таким образом, результаты экспериментов являются аргументом для решения проблемы формирования валов севера Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна, а также их надо принимать во внимание при интерпретации валообразных поднятий на других молодых и древних платформах.

#### **Литература**

Гончаров М. А., Фролова Н. С. Парадокс ориентировки некоторых новейших нефтегазоносных брахиантиклиналей сдвиговых зон вдоль оси максимального сжатия: тектоно-физическое истолкование // Общие и региональные проблемы тектоники и геодинамики. Т. 1. М. : ГЕОС. 2008. С. 218–222.

## **МЕХАНИКА ОБРАЗОВАНИЯ СЕТЕЙ ТРЕЩИН РАСТЯЖЕНИЯ: ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

**А. И. Шеменда**

Университет Лазурного Берега, г. Ницца, Франция  
chemenda@geoazur.unice.fr

Трещины (растяжения, скола, отрыва, кливажа), или joints, являются самыми распространенными в верхней земной коре и часто формируют впечатляющие регулярные сети. Большой интерес к этим трещинам был изначально вызван их большим влиянием на проницаемость нефтяных и газовых резервуаров. Интенсивность трещинообразования в резервуарах непрерывно увеличивается по мере их выработки. В последние годы растет также понимание того, что этот процесс играет фундаментальную роль в формировании и эволюции разломных зон, включая сейсмические разрывы. Традиционно формирование joints рассматривается в рамках Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM), согласно которой эти трещины являются результатом концентрации напряжений на кончиках существующих маленьких (сантиметрового размера (Olson et al., 2006)) тре-

щин, где материал разрушается, приводя к продвижению трещины в упругой среде. Целый ряд наблюдений не вписывается в эту доминирующую парадигму. Экспериментальные данные, приведенные недавно в [Chemenda, 2019], показали, в частности, что базовая предпосылка этой теории является неверной и что значительная неупругая деформация предшествует и сопровождает трещинообразование. Описание этой деформации включено в определяющие уравнения, использованные в численных моделях [Role of heterogeneities ... , 2018; Chemenda, 2019]. Результаты моделирования показали, что сеть параллельных трещин спонтанно инициируется в однородном материале в виде дилатансионных деформационных полос, растущих в процессе деформации. Их толщина и длина зависят от степени пластичности материала, которая увеличивается с давлением. Прочность материала быстро уменьшается с неупругой деформацией в полосе, что приводит к зарождению трещин там, где прочность достигла нуля. Эти зародыши трещин затем растут, следуя за продвигающимися деформационными полосами ([www.insu.cnrs.fr/en/node/3718](http://www.insu.cnrs.fr/en/node/3718)). Область между кончиками полосы и растущей в ней трещины соответствует так называемой process zone. В развитии полос и трещин важную роль играет не только растягивающий (tension), но также и сдвиговый механизм разрушения. Значение последнего увеличивается с давлением  $P$ , и при достаточно большом  $P$  образуются сдвиговые трещины. Численные модели воспроизводят вплоть до деталей экспериментальные результаты, полученные в рамках близкой постановки [Mode I cracking ... , 2011; Joran, Chemenda, Petit, 2012].

#### **Литература**

Chemenda A. I. Origin of regular networks of joints: Experimental constraints, theoretical background, and numerical modeling // *J. Geophys. Res.* 2019. 124 p.

Role of heterogeneities in jointing (fracturing) of geological media: Numerical analysis of fracture mechanisms / A. I. Chemenda, J. Ambre, J. Chen, J. Fan, J.-P. Petit, D. Jiang // *C. R. Geosciences.* 2018. Vol. 350. P. 452–463.

Mode I cracking versus dilatancy banding: Experimental constraints on the mechanisms of extension fracturing / A. I. Chemenda, Si-H. Nguyen, J. P. Petit, J. Ambre // *J. Geophys. Res.* 2011. Vol. 116. B04401.

Jorand C., Chemenda A. I., Petit J.-P. Formation of parallel joint sets and shear band fracture networks in physical models // *Tectonophysics.* 2012. Vol. 581. P. 84–92.

## РАЗДЕЛ 4

# ФЛЮИДНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ РАЗЛОМНЫХ ЗОН. СТРУКТУРНЫЙ КОНТРОЛЬ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ

## ВЛИЯНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДЕФОРМИРОВАНИЕ ВОДОНАСЫЩЕННОГО КОЛЛЕКТОРА ПО ДАННЫМ ПРЕЦИЗИОННОГО ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

**Э. М. Горбунова, А. Н. Беседина, Н. В. Кабыченко,  
И. В. Батухтин, С. М. Петухова**

Институт динамики геосфер им. академика М. А. Садовского РАН  
г. Москва, Россия  
emgorbunova@bk.ru

Модернизация измерительной цифровой аппаратуры и увеличение пунктов сейсмического и гидрогеологического мониторинга позволяют регистрировать вариации уровня подземных вод и давления в системе «пласт – скважина» при квазистационарных и эпизодических воздействиях в широком диапазоне частот. Особое внимание уделяется анализу разнообразных гидрогеологических эффектов, зарегистрированных на разных эпицентральных расстояниях при прохождении сейсмических волн от землетрясений. В результате многолетних наблюдений, проводимых преимущественно в сейсмоактивных регионах, выделены основные типы гидрогеологических эффектов: предвестники, косейсмические и постсейсмические вариации уровня подземных вод, которые рассматриваются в качестве индикаторов как динамического, так и необратимого режима деформирования водонасыщенных коллекторов [Киссин, 2015; Копылова, Болдина, 2019; Wang, Manga, 2010].

В платформенных условиях впервые зарегистрированы гидрогеологические отклики на удаленные землетрясения  $M_w = 6,4-9,1$  на территории геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево» по результатам прецизионного мониторинга, проводимого с февраля 2008 г. Установлена зависимость динамических колебаний уровня от максимальной скорости смещения грунта, которая аппроксимируется степенной зависимостью. Выполнена оценка относительной деформации водонасыщенного

коллектора при прохождении сейсмических волн от удаленных землетрясений. Прослежено расхождение между реакцией водонасыщенного коллектора, находящегося в напорных и безнапорных условиях, на однотипное сейсмическое воздействие.

С июля 2019 г. новый пункт наблюдений, оборудованный прецизионным аппаратурно-измерительным комплексом, организован в промышленном регионе в пределах железорудного месторождения Курской магнитной аномалии, разрабатываемого открытым и подземным способами с использованием взрывных технологий. Основная цель проводимых исследований – изучение влияния сейсмического воздействия массовых взрывов на фильтрационные свойства водонасыщенных коллекторов. Исследования по данной тематике не проводятся, публикации отсутствуют. Впервые в результате обработки полученных экспериментальных данных определены диапазоны вариаций давления в системе «пласт – скважина», которые изменяются в широком диапазоне от 20 Па до 13 кПа на приведенных расстояниях от 63 до 404 м/кг<sup>1/3</sup>. Отмечено различие в реакции водонасыщенных коллекторов порового и трещинно-порового типа на проведение взрывов в камерах, по-разному ориентированных по отношению к пункту наблюдений, которое может быть связано не только с неоднородным строением разрабатываемого массива горных пород, наличием разрывных нарушений, изменением гидрогеодинамической обстановки, но и с технологией ведения взрывных работ и степенью нарушенности шахтного поля.

*Исследование выполнено по теме госзадания № АААА-А17-117112350020-9 и при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 19-05-00809 и № 20-35-90016.*

#### **Литература**

- Киссин И. Г. Флюиды в земной коре. Геофизические и тектонические аспекты. М. : Наука, 2015. 328 с.
- Копылова Г. Н., Болдина С. В. Гидрогеосейсмические вариации уровня воды в скважинах Камчатки. Петропавловск-Камчатский : Камчатпресс, 2019. 144 с.
- Wang C.-Y., Manga M. Earthquakes and Water. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. 228 p.

## **ПОЛОЖЕНИЕ КРУПНОМАСШТАБНЫХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ЛИНЕАМЕНТНО-БЛОКОВОЙ СТРУКТУРЕ АЛТАЕ-САЯНСКОГО РЕГИОНА**

**А. И. Горшков, А. И. Ливинский, О. В. Новикова**

Институт теории прогноза землетрясений  
и математической геофизики РАН, г. Москва, Россия  
gorshkov@mitp.ru

Цель работы – определение характерных геолого-геофизических признаков мест локализации крупных месторождений металлов в Алтае-Саянском регионе и выявление на их основе потенциально рудоносных структур. Задача решается математическими методами распознавания образов на основе установленной ранее связи месторождений металлов с узлами пересечения морфоструктурных линейментов в горных поясах Средиземноморья [Горшков, Соловьев, 2004, 2006]. В этих работах использовалась информация о месторождениях металлов, представленная на металлогенических картах, которые в разных странах составлены по различным принципам, характеристики месторождений на этих картах не унифицированы. В настоящее время созданы электронные базы данных месторождений мира. Их использование позволяет на новом качественном уровне исследовать корреляцию рудных месторождений с узлами пересечения линейментов. В работе использована созданная под руководством Д. В. Рундквиста в ГГМ РАН им. В. И. Вернадского электронная база данных крупных и суперкрупных месторождений мира [База данных и металлогеническая ... , 2004].

Сначала было проанализировано положение крупных месторождений металлов в линейментно-блоковой структуре Алтае-Саянского региона, которая определена в результате морфоструктурного районирования, выполненного с использованием геологических, геоморфологических данных и материалов дистанционного зондирования Земли. Установлена связь крупных и суперкрупных месторождений металлов Алтае-Саянского региона с узлами пересечения линейментов. Затем с помощью алгоритма распознавания образов КОРА-3 [Условия возникновения ... , 1976] определены характерные геолого-геофизические и геоморфологические признаки узлов, вмещающих крупные месторождения металлов. Обучение алгоритма КОРА-3 было проведено по двум выборкам. Выборку Р (рудоносные узлы) составили узлы, в которых известны крупномасштабные месторождения металлов. В выборку НР (нерудоносные узлы) включались узлы, в которых в настоящее время месторождения рассматриваемых типов и размеров не известны. Характерные признаки узлов классов Р и НР определены алгоритмом КОРА-3 в результате анализа обучающих выборок. Потенциально рудоносные узлы определены



на основе этих признаков. В результате проведенного распознавания узлы, в которых известны месторождения рассмотренных типов и размеров, были классифицированы как Р и определено семь узлов, которые по своим признакам сходны с рудоносными узлами и могут рассматриваться как потенциально рудоносные.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 20-05-00171 А.*

#### **Литература**

Условия возникновения сильных землетрясений (Калифорния и некоторые другие регионы) / И. М. Гельфанд, Ш. А. Губерман, В. И. Кейлис-Борок, Л. Кнопоф, Ф. Пресс, Е. Я. Ранцман, И. М. Ротвайн, А. М. Садовский // Исследование сейсмичности и моделей Земли. М. : Наука, 1976. С. 3–91.

Горшков А. И., Соловьев А. А. Определение характеристик рудоносных узлов методами распознавания образов // Крупные и суперкрупные месторождения: закономерности размещения и условия образования. М. : ИГЕМ РАН, 2004. С. 381–390.

Горшков А. И., Соловьев А. А. Распознавание облика рудных месторождений в поясе Тетис // Крупные и суперкрупные месторождения рудных полезных ископаемых. В 3 т. Т. 1. Глобальные закономерности размещения (ред. Д. В. Рундквист). М. : ИГЕМ РАН, 2006. С. 361–374.

База данных и металлогеническая карта крупных и суперкрупных месторождений мира: принципы составления и предварительный анализ результатов / Д. В. Рундквист, А. В. Ткачев, С. В. Черкасов, Ю. Г. Гатинский, Н. А. Вишневская // Крупные и суперкрупные месторождения: закономерности размещения и условия образования. М. : ИГЕМ РАН, 2004. С. 391–422.

## **ЭВОЛЮЦИЯ СЕВЕРО-НУРАТИНСКОГО ГЛУБИННОГО РАЗЛОМА**

**Д. И. Джуманиязов, Ф. Б. Каримова**

Институт геологии и геофизики им. Х. М. Абдуллаева  
Госкомгеологии РУз, г. Ташкент, Узбекистан  
denisbey@list.ru

Геотектонический план подвижного пояса юго-западного Тянь-Шаня в значительной мере обусловлен заложением и развитием нескольких сближенных и параллельных глубинных разломов – Кызылкумо-Северонуратинского, Южно-Нуратинского, Зарафшанского и Северо-Гиссарского. Эти глубинные разломы отстоят друг от друга на 30–40 км и связаны между собой перемычками, что определяет общую высокую подвижность пояса и единство его геодинамики (Гесь, 1999 г.).

Стволовая зона Северо-Нуратинского глубинного разлома отделяет Сырдарьинский срединный массив от собственно подвижного пояса и по-разному с ним взаимодействует. Прилегающая к ней часть срединного массива в пределах полосы шириной 20–25 км подвергалась тектоно-

магматической активизации: раскалыванию на продольные плоские блоки и внедрению в межблоковые зоны базальтовых и липаритовых расплавов. Общий уровень метаморфизма пород девон-каменноугольного чехла (мощность не менее 4–5 км) здесь низкий – доаспидный (Бискэ, 1996 г.). Однако для межблоковых зон типичен интенсивный «дислокационный метаморфизм», выразившийся в повсеместном дроблении массивных карбонатных пород, будинировании и разлинзовании тонкослоистых карбонатно-терригенных их разностей. Отличаясь высокой проницаемостью для флюидов, зоны приразломных дислокаций чехла среднего массива повсеместно локализовали процессы сульфидно-углеродистого метасоматоза и доломитизации пород. В связи с этим узкие (0,3–1,2 км) полосы таких метасоматических пород прослеживаются на десятки километров и четко коррелируются с зонами дислокаций чехла. При наложении на них более поздних процессов кислотного выщелачивания (серцитизация, окварцевание, карбонатизация, баритизация), сопутствующего внедрению субвулканических порфировых интрузий, в измененных терригенно-карбонатных породах формируется вкрапленно-прожилковое свинцово-цинковое оруденение (Мусаев и др., 2019 г.).

Стволовая разломная зона на эрозионном срезе представлена полосой почти вертикально падающих сланцев высоких и средних ступеней метаморфизма, развитых по терригенным и основным вулканогенным породам, а также смешанным по составу тектоническим меланжем, состоящим из фрагментов терригенных, вулканических и карбонатных пород палеозоя; во многих участках она содержит тонкие инъекции основных, ультраосновных и кислых магматических пород, углеродистых, кремнистых и других флюидизитов. Минимальная ширина этой полосы 0,5–1 км. Местами она разделяется плоскими линзами или остроклиновидными блоками тектонически менее переработанных пород на две-три части и расширяется до 3–4 км. Падение стволовой зоны на изученном участке – южное под углами от 80 до 90°.

В восточной части региона стволовая зона расщепляется на несколько каналов, расходящихся под острыми углами в сторону Ферганской впадины; в западной части его наблюдается аналогичная, но западная виргация ствола глубинного разлома, проявляющегося в горах Дарбаза в полосе шириною 6–7 км, уже в виде нескольких каналов неоднородно дислоцированных терригенно-карбонатных и вулканогенных пород.

Отмеченная двусторонняя виргация стволовой структуры глубинного разлома является лишь фрагментом аналогичной по характеру общей кинематики виргации подвижного пояса. От стволовой структуры отщепляются две мощные сдвиговые зоны второго порядка, которые уходят в пределы подвижного пояса в противоположных юго-западном и юго-восточном направлениях и определяют клиновидно-веерный план его структуры в западной и восточной частях. При этом структурно четко обособляется центральная часть региона.

В итоге рассматриваемая часть подвижного пояса крупными межблочными зонами расчленяется на три структурные единицы первого порядка: западный (Темиркабукский), центральный (Кошрабадский) и восточный (Койташский) мегаблоки.

## **СТРУКТУРНАЯ ПОЗИЦИЯ ЗОЛОТОГО И ДЕМАНТОИДНОГО ОРУДЕНЕНИЯ В АЛЬПИНОТИПНЫХ ГИПЕРБАЗИТАХ ГЛАВНОГО УРАЛЬСКОГО РАЗЛОМА**

**А. Ю. Кисин<sup>1,2</sup>, Е. С. Карасева<sup>1</sup>, В. В. Мурзин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> Уральский государственный горный университет

г. Екатеринбург, Россия

kissin@igg.uran.ru

В современной трактовке Главный Уральский разлом (ГУР) на Среднем Урале разделяет палеоконтинентальный (на западе) и палеоокеанический (на востоке) сектора. Единой точки зрения на его природу нет. К ультрабазитовым массивам ГУР приурочены различные рудные и нерудные месторождения. В докладе рассматривается структурная позиция месторождения золота в Карабашском массиве и демантоида в Коркодинском, что может быть полезно в определении генетической природы ГУР. Исследованы малые структурные формы в ультрабазитах Карабашского массива, представленные блоками антигоритизированных дунитов, и показано, что: 1) их оси вращения круто падают на СВ; 2) блоки испытали деформацию кручения по часовой стрелке и растяжение вдоль оси вращения; 3) они претерпели синтетектонический катаклиз и перекристаллизацию, трещины были залечены жильным материалом; 4) зеркала скольжения на поверхности тел вращения редки – обычны щелевидные полости, инкрустированные кристалликами антигорита. Основные выводы [Кисин, Мурзин, Притчин, 2016]: 1) деформации кручения указывают на перемещение квазипластичного материала вверх в условиях правого сдвига и декомпрессии; 2) наклон осей вращения указывает на активность восточного крыла правого сдвига; 3) декомпрессия восходящего тектонического потока явилась причиной образования крупных крутопадающих трещин растяжения, автометаморфизма и гидротермальной деятельности с образованием золотоносных родинитов и магнетит-хлорит-карбонатных пород; 4) деформации кручения подготовили структуры для формирования богатых рудных столбов. По результатам дешифрирования космоснимков предполагается, что рудные столбы на южном фланге месторождения на глубине срезаны деформациями кручения массива. Близкая ситуация наблюдается и на месторождении де-

мантоида [Проблемы структурного ... , 2020]. Наиболее крупные декомпрессионные трещины ориентированы согласно ГУР, а минерализованные зоны имеют столбообразную форму.

Данные массивы рассматриваются нами как корово-мантийная смесь, поднятая тектоническим потоком и испытавшая декомпрессию, синдекомпрессионный автометаморфизм, автометасоматизм, гидротермально-метасоматическое минералообразование.

*Работа выполнена в рамках госзадания № АААА-А18-118052590028-9.*

#### **Литература**

1. Кисин А. Ю., Мурзин В. В., Притчин М. Е. Тектоническая позиция золотого оруденения горы Карабаш (Южный Урал): по результатам изучения малых структурных форм // Литосфера. 2016. № 4. С. 79–91.

2. Проблемы структурного контроля демантоидной минерализации на Полдневском месторождении / Кисин А. Ю. [и др.] // Известия УГГУ. 2020. № 2. С. 64–73.

## **СТРУКТУРНЫЙ КОНТРОЛЬ СВЕТЛИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА И СВЕТЛИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ГОРНОГО ХРУСТАЛЯ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)**

**А. Ю. Кисин<sup>1,2</sup>, М. Е. Притчин<sup>1</sup>, В. Н. Огородников<sup>1,2</sup>,  
Ю. А. Поленов<sup>2</sup>, Д. А. Озорнин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> Уральский государственный горный университет

г. Екатеринбург, Россия

kissin@igg.uran.ru

В западной части Кочкарского антиклинория (Южный Урал) известны два крупных одноименных месторождения – золота и горного хрусталя. Структурный контроль золотого оруденения связывался с крупным надвигом [Корово-мантийное оруденение ... , 1989], а в отношении горного хрусталя единого мнения не имеется. Месторождение золота обрабатывается карьером, что позволяет изучить структурный контроль оруденения. Ежегодный мониторинг карьера с 2009 г. позволил выработать схему структурного контроля, которая справедлива для обоих месторождений.

В позднем девоне в условиях коллизии сформировался глубинный надвиг западного падения [К вопросу о структурной ... , 1973], обусловивший разнознаковые изгибные деформации: отрицательный изгиб в висячем боку и положительный в лежащем [Кисин, Коротеев, 2017]. К западу от надвига получила развитие линейная складчатость, а к восто-

ку – куполовидные (брахиоформные) структуры. Появление терригенно-карбонатных пород ( $C_{1V}$ ) в лежачем крыле надвига указывает на локальное погружение участка коры, а распространение в них оползневых структур свидетельствует о синхронности надвигания и опускания. Региональный метаморфизм в антиклинории начался в  $D_3$  и достиг кульминации в  $C_2$ . Интенсивность метаморфизма нарастала во времени, в условиях от глубинных к менее глубинным. Фокусирование сжатия в нижней части блока с положительным изгибом вызвало разогрев пород, высокобарический метаморфизм, движение флюидов, пластических и квазипластических масс горных пород вверх с формированием гранитогнейсовых куполов – центров зонального высокоградного метаморфизма. По ряду признаков нами выделена Светлинская купольная структура, в апикальной части которой находится месторождение горного хрусталя, сформированное на постколлизиионном этапе. Западное крыло купола осложнило строение надвиговой зоны веерообразным пакетом крутых взбросов листрического типа: вверху – падение западное, внизу – восточное. Взбросы рудовмещающие. В парагенезе наблюдаются крутопадающие сближенные субпараллельные трещины растяжения, выполненные синтетектоническим кварцем. Источником Au явились породы антиклинория, подвергшиеся гранитизации. Основная масса рудных минералов отложилась на постколлизиионном этапе.

*Работа выполнена в рамках госзадания № АААА-А18-118052590028-9.*

#### **Литература**

Корово-мантийное оруденение в сиалических блоках эвгеосинклинали / В. Н. Сазонов [и др.]. Свердловск : УрО АН СССР, 1989. 113 с.

К вопросу о структурной эволюции Кочкарского антиклинория / А. Г. Кейльман, В. Б. Болтыров, Ю. И. Бурьян, В. Т. Горожанкин // Геология метаморфических комплексов Урала. Тр. СГИ. Вып. 91. 1973. С. 38–45.

Кисин А. Ю., Коротеев В. А. Блоковая складчатость и рудогенез. Екатеринбург : ИГГ УрО РАН, 2017. 349 с.

## ГЛУБИННЫЕ РАЗЛОМЫ, ИХ РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ КИМБЕРЛИТОВ

С. И. Костровицкий<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт геохимии СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия  
serkost@igc.irk.ru

Рассмотрены особенности тектонического контроля (ТК) формирования разных таксонов проявлений кимберлитов в пределах Якутской кимберлитовой провинции (ЯКП): провинция, поле, куст, трубка. ТК в пределах ЯКП проявляется в их пространственной приуроченности к трем линейным зонам: Вилуйско-Мархинской, Далдыно-Оленекской и Оленек-Анабарской. Два поля с наиболее высоким уровнем алмазонасности – Мирнинское и Накынское – приурочены к Вилуйско-Мархинской зоне. Двенадцать полей с разным уровнем алмазонасности (от убогого до высокого), разных эпох формирования сосредоточено в Далдыно-Оленекской зоне, которая контролируется Далдыно-Оленекской системой глубинных разломов северо-восточного простирания общей протяженностью более 1000 км при ширине 90–120 км. Примечательно, что в пределах Далдыно-Оленекской зоны обнаруживаются поля, принадлежащие разным эпохам формирования. В эту зону с ЮЗ на СВ последовательно входят три алмазонасных поля, имеющих возраст 369–344 Ма (Алакит-Мархинское, Далдынское, Верхнемунское); пять полей с неалмазонасными трубками или с убогой алмазонасностью возрастом 429–408 Ма (Чомурдахское, Западно-Укукитское, Восточно-Укукитское, Огонер-Юряхское, Мерчимденское); три поля с неалмазонасными трубками или с убогой алмазонасностью возрастом 157–146 Ма (Куойкское, Молодинское и Хорбусуонское); одно поле с неалмазонасными трубками или с убогой алмазонасностью возрастом 350–370 Ма (Толуопское). Средоточие разновозрастных проявлений кимберлитового вулканизма в пределах одной линейно вытянутой структуры, названное коридором (corridor), обнаруживается и в ряде других провинций мира, например: в Северо-Американской (Слэйв кратон, 4 возрастные группы от 535–523 млн лет для дайки Snap Lake, до 74–48 млн лет для трубок Las de Gras поля); Ангольской, Южно-Африканской; Бразильской.

Существование линейной субмеридиональной зональности в пространственном распределении вещественных характеристик кимберлитов в пределах Далдынского поля (содержания FeO, TiO<sub>2</sub> в кимберлитах, соотношения Пм/Грт) свидетельствует о ТК формирования магматического очага кимберлитов на уровне астеносфера – литосфера. Линейные кусты трубок, изменение формы трубок с глубиной от изометричной до дайки указывают на роль разломной тектоники в формировании этих таксонов.

Такие особенности проявления кимберлитового вулканизма, как совпадение возрастов его активности на разных континентах, его приуроченность к линейным зонам большой протяженности, совмещение в пределах одной зоны кимберлитов разных эпох формирования, указывают на глобальную, возможно даже планетарного масштаба, причину его возникновения. Высказаны разные предположения о причинах нарушения равновесных условий в астеносфере, в том числе в результате восхождения плюма, прохождения плиты через горячую точку, над горячим полем, открытия Атлантического океана; разрушения Гондваны; отделения Африканского континента от Южно-Американского в мезозойское время и др. Нельзя исключать из числа триггеров кимберлитового вулканизма и причину космического происхождения, например ударное воздействие на нашу планету крупных космических тел (болидов, комет).

## **ТЕКТОНИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ И МЕТАЛЛОГЕНИЯ АЛДАНСКОЙ ГРАНУЛИТО-ГНЕЙСОВОЙ ОБЛАСТИ НА ЮГЕ СЕВЕРО-АЗИАТСКОГО КРАТОНА**

**А. А. Кравченко, Е. Е. Лоскутов, А. И. Мельников,  
В. Ф. Тимофеев, Е. И. Кириллин, В. И. Березкин,  
А. В. Округин, Н. В. Попов**

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН  
г. Якутск, Россия

Алданская гранулитогнейсовая область расположена в центре Алдано-Станового щита. На западе, юге и востоке гранулитовые комплексы граничат с гранит-зеленокаменными террейнами, на севере перекрыты чехлом платформенных отложений. Формирование гранулитовых комплексов тесно связано с аккреционно-коллизийными событиями в период 2,2–1,9 млрд л. н., приведшими к формированию Северо-Азиатского кратона [Смелов, Тимофеев, 2003]. Изучение структуры гранулитовых комплексов способствует расшифровке эволюции кратона и факторов, контролирующих распределение благородных металлов и единичных находок алмаза [Полигенез алмазов ... , 2011; Условия залегания алмазоносных ... , 2000] на южной его окраине. Многочисленными исследованиями предшественников обнаружено, что характерны два типа структур: 1) купольные пликативные структуры; 2) линейные зоны складчатости и разрывных нарушений. В ходе проведенного исследования построена геофизическая модель трансформированных полей, в полевых условиях изучены ее отдельные элементы, выявлены специфические геологические структуры. Обнаружено наличие в обрамлении ку-

польных структур двух протяженных зон интенсивной складчатости и двух простираний сланцеватости. Деформация в зонах содержит ротационный компонент, отражающий латеральное смещение сегментов боковых пород друг относительно друга. Распространены Z-сигмюиды и групповые складки волочения. Подобные зоны в современной геологической литературе называются shear-зонами и связываются в том числе с аккреционно-коллизийными событиями. Следующие за их формированием деформации представлены зонами трещиноватости, будинажа и дробления пород – разломами. Преобладает субмеридиональное (ССВ) простирание разломов. В породах чехла обнаружены листрические сбросы и складки гравитационного скольжения, ребристость на поверхности сдвигов. Находки благородных металлов и алмаза контролируются близкими тектоническими структурами. Подобная закономерность характерна для докембрийских провинций [The Great Mineral ... , 2016; Wyman, Kerrich, 2010; Multicommodity mineral ... , 2016]. Структура Алданской гранулитогнейсовой области сходна со свекофенидами юга Финляндии, в которых купола гранитоидов окружены shear-зонами с многочисленными проявлениями и месторождениями полезных ископаемых [Gaál, Sundblad, 1990; Mineral deposits ... , 2012].

*Работы выполнены по госзаданию ИГАБМ СО РАН. Фактический материал собран в рамках проекта РФФИ 18-45-140002 p\_a и др., а также договоров с предприятиями «Якутскгеология», «Золото Селигдара».*

#### **Литература**

- Смелов А. П., Тимофеев В. Ф. Террейновый анализ и геодинамическая модель формирования Северо-Азиатского кратона в раннем докембрии // Тихоокеанская геология. 2003. № 6. С. 42–55.
- Полигенез алмазов Сибирской платформы / В. П. Афанасьев, С. С. Лобанов, Н. П. Похиленко, В. И. Коптиль, С. И. Митюхин, А. В. Герасимчук, Б. С. Помазанский, Н. И. Горев // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 3. С. 335–353.
- Условия залегания алмазоносных пород в земной коре / Н. Н. Перцев, А. А. Маракушев, А. В. Мохов, И. П. Лапутина // Отечественная геология. 2000. № 1. С. 24–28.
- The Great Mineral Fields of Africa / S. Frost-Killian, S. Master, R. P. Viljonen, M. G. C. Wilson // Episodes. 2016. Vol 39, N 2. P. 85–103.
- Wyman D. A., Kerrich R. Mantle plume volcanic arc interaction: consequences for magmatism, metallogeny, and cratonization in the Abitibi and Wawa subprovinces, Canada // Canadian Journal of Earth Sciences. 2010. Vol. 47. P. 565–589.
- Multicommodity mineral systems analysis highlighting mineral prospectivity in the Halls Creek Orogen / S. A. Occhipinti, V. Metelka, M. D. Lindsay, J. A. Hollis, A. R. A. Aitken, I. M. Tyler, J. M. Miller, T. C. McCuaiga // Ore Geology Reviews. 2016. Vol. 72. P. 86–113.
- Gaál G., Sundblad K. Metallogeny of gold in the Fennoscandian Shield // Mineral. Deposita 25. 1990. P. 104–114.
- Mineral deposits and metallogeny of Fennoscandia / Eilu P. ed. Geological Survey of Finland, 2012. Special Paper 53. 401 p.



## КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ ПРИАМУРЬЯ И ИХ РОЛЬ В РАЗМЕЩЕНИИ РОССЫПЕЙ ЗОЛОТА

**А. В. Мельников**

Институт геологии и природопользования ДВО РАН  
г. Благовещенск, Россия  
Melnikov\_Anton1972@mail.ru

Влияние кольцевых структур (КС) на локализацию рудных месторождений отмечено в работах многих исследователей и, по существу, общепризнано. В то же время роль КС в распределении россыпных месторождений золота изучена слабо.

Нами проанализировано распределение россыпей, россыпепроявлений и шлиховых ореолов золота в ряде рудно-россыпных районов Верхнего Приамурья, характеризующихся наличием разновозрастных и разнотипных КС.

На топографической основе масштаба 1:500 000 с использованием аэрокосмоснимков, геологических и геоморфологических карт были выделены КС по методу структурно-геоморфологического дешифрирования. Всего было выделено и проанализировано в отношении россыпной золотоносности 20 КС. Затем указанные КС по совокупности геолого-геоморфологических признаков и составу пород были разделены на морфологические и генетические типы и рассчитана частота встречаемости этих групп и золотоносных россыпей, россыпепроявлений и шлиховых ореолов в их пределах и в непосредственной близости от них. С помощью планиметра подсчитаны площади, занимаемые различными типами КС. В итоге установлено следующее.

1. Намечается неконтрастно выраженная избирательная приуроченность большинства россыпей золота к КС. Последние занимают порядка 42 % изученной площади, однако на их долю приходится более половины всех имеющихся в регионе россыпей – 60 %. Остальные россыпи также в той или иной мере находятся в зоне влияния КС: 20 % располагается в непосредственной близости от них.

2. В зависимости от морфологических особенностей КС имеют существенно различную золотоносность. В соответствии с классификацией В. В. Соловьева [1973] в регионе выделяются три основные морфологические группы КС: купольные, кольцевые и купольно-кольцевые.

3. Устанавливается отчетливая зависимость золотоносности КС от их генетического типа, выявленного по совокупности геологических и морфотектонических признаков.

Интрузивно-магматические и вулканотектонические КС составляют в сумме 38 %, т. е. более одной трети от всех выделенных КС, однако на их долю приходится всего 16 % россыпей. В то же время антикли-

нальные КС, составляющие менее одной трети от всех КС, содержат 45 % россыпей, локализованных в КС. В гетерогенных денудационных КС, составляющих 30 %, зафиксировано 39 % россыпей. Следовательно, денудационные и антиклинальные КС можно рассматривать как наиболее благоприятные для формирования россыпей.

Наиболее продуктивными являются антиклинальные КС – целостные системы поднятий, сложенные как относительно молодыми мезозойскими, так и древними палеозойскими и даже протерозойскими терригенно-осадочными комплексами пород, подвергшимися в конце мезозоя – начале кайнозоя процессам ТМА.

Выделение КС и их разбраковка по морфологии, генезису и степени золотоносности рекомендуются при совместном, комплексном проведении металлогенических, структурно-тектонических и геолого-геоморфологических исследований. Данные исследования эффективны прежде всего на предварительном поисково-оценочном этапе работ.

#### **Литература**

Соловьев В. В. Морфоструктуры центрального типа горных стран, их классификация и практическое значение // Структурная геоморфология горных стран. Фрунзе, 1973. С. 17–29.

## **НАЗЕМНЫЙ СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ТЕХНОГЕННОЙ И ЕСТЕСТВЕННОЙ ТРЕЩИНОВАТОСТИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОВРЕМЕННОГО ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ**

**С. А. Михайлов<sup>1</sup>, М. Л. Чернов<sup>1</sup>, Д. Н. Зайцев<sup>1,2</sup>,  
И. И. Нугманов<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> ООО «Сигма», г. Казань, Россия

<sup>2</sup> Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия

<sup>3</sup> АНО ВО «Университет Иннополис», г. Иннополис, Россия  
info@sigma-geophys.com

Азимут развития техногенных трещин (трещин гидроразрыва пласта для увеличения нефтеотдачи) обусловлен современным полем тектонических напряжений. Согласно тектонофизическим представлениям [Ребецкий, Сим, Маринин, 2017; Zobak, 2007], распространение трещины гидроразрыва в дальней зоне (более трех радиусов скважины) соответствует азимуту максимального сжимающего напряжения. Результаты микросейсмического мониторинга на двух скважинах, проведенного в горизонтальном окончании скважин, вскрывших турнейские и башкирские продуктивные отложения соответственно, показывают, что азимут максимального сжимающего напряжения определяется средним значением  $48,75^\circ(228,75^\circ)$  с простиранием СВ–ЮЗ. Стандартное отклонение

определения азимута  $5,77^\circ$ . Следует отметить, что ориентация трещины гидроразрыва (ГРП) на стадиях тестовой закачки и основного ГРП характеризуется хорошей сходимостью. Согласно классификационным критериям [Lund Snee, Zoback, 2020] по точности определения направления максимального сжимающего напряжения методами микросейсмического мониторинга процесса ГРП результаты мониторинга на указанных скважинах отвечают категории С, что сопоставимо с мировым стандартом классификации проекта «Мировая карта напряжений» [WSM quality ranking ... , 2016]. В процессе формирования трещины ГРП происходит конкурентная активация существующих систем естественных трещин. Увеличение объема закачки приводит к большему пространственному охвату области реактивации существующих трещин. На основе концепции критически напряженного состояния массива горных пород была проведена схематизация сети естественной трещиноватости. Выделенные трещины могут быть сгруппированы в следующие системы трещин с условной кинематикой: а) взбросы СЗ простирания с Аз.  $146,79^\circ$  ( $326,79^\circ$ ); б) сбросы, сонаправленные с азимутом трещин ГРП; в) сдвиги СВ и З–СЗ простирания с Аз.  $24^\circ$  ( $204^\circ$ ) и  $95^\circ$  ( $275^\circ$ ) соответственно. На основе анализа пространственного положения гипоцентров микросейсмических событий можно сделать вывод, что интерференции техногенных трещин ГРП на смежных портах разрывных муфт не происходит. Однако гидравлическая связь между портами обеспечивается сетью естественных трещин. На основе расчета напряженно-деформированного состояния по полигону напряжений установлено, что для глубин проведения МГРП обеих скважин характерен режим горизонтального растяжения.

#### **Литература**

- Ребецкий Ю. Л., Сим Л. А., Маринин А. В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методы и алгоритмы. М. : ГЕОС, 2017. 234 с.
- Zoback M. L. Reservoir Geomechanics. New York : Cambridge University Press, 2007.
- Lund Snee J.-E., Zoback M. D. Multiscale variations of the crustal stress field throughout North America // Nature Communications, 2020. Т. 11, № 1, С. 1–9.
- WSM quality ranking scheme, database description and analysis guidelines for stress indicator / O. Heidbach, A. Barth, B. Müller, J. Reinecker, O. Stephansson, M. Tingay, A. Zang // World Stress Map Technical Report 16–01, GFZ German Research Centre for Geosciences.

## ГЕОТЕКТОНИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЛИТИЕВЫХ ПЕГМАТИТОВ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА

Л. Н. Морозова

Геологический институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия  
morozova@geoksc.apatity.ru

В Арктической зоне Кольского региона расположен Кольский редкометалльный пегматитовый пояс (КРПП), в котором сосредоточены до 95 % жил пегматитов с редкометалльной минерализацией (Be, Ta, Nb, Cs, Li), выявленных на Кольском полуострове [Кольский пегматитовый пояс ... , 2020]. КРПП пространственно совпадает с зоной сочленения архейских Мурманской и Кольской провинций. Зона сочленения представляет собой линейную структуру, которая рассматривается как мобильно-проницаемая зона, заложенная в архее и частично активизированная в палеопротерозое. В русскоязычной литературе такие линейные структуры описывались как глубинные разломы. В современных концепциях структурной геологии и тектоники литосферных плит они интерпретируются как транскоровые зоны сдвигового течения (shear zones) на границах крупных блоков земной коры или литосферных плит. Вследствие своей проницаемости такие зоны являются каналами, по которым циркулируют рудоносные флюиды, при этом рудные компоненты осаждаются не только внутри этих зон, но и в их бортах [Кольский пегматитовый пояс ... , 2020; Spodume from rare-metal ... , 2021]. Значительную часть зоны сочленения Мурманской и Кольской провинций занимает архейский зеленокаменный пояс Колмозеро-Воронья, в котором сосредоточены месторождения редкометалльных пегматитов: Полмостундровское (Li), Олений хребет (Ta), Охмыльк (Ta) и Васин-Мыльк (Cs). В непосредственной близости от зоны сочленения Мурманской и Кольской провинций находятся еще два месторождения – Шонгуйское (Be) в Кольской провинции и Колмозерское (Li) в Мурманской провинции.

Редкометалльные пегматиты Колмозерского литиевого месторождения характеризуются промышленными содержаниями лития (ppm) Li (12244), высокими содержаниями Cs (23), Nb (81), Ta (59) и Be (142), низкими содержаниями Ba ( $\leq 20$ ), Sr ( $\leq 15,4$ ), Y ( $\leq 0,46$ ), Th (2,5) Zr ( $\leq 22$ ) и  $\sum REE$  ( $\leq 3$  г/т) и низкой величиной индексов фракционирования - Mg/Li ( $\leq 0,05$ ) и (Zr/Hf ( $\leq 7,4$ )). В этих пегматитах сподумен является основным минералом лития [Морозова, 2018]. U-Pb возраст колумбита (Mn) из пегматитов Колмозерского литиевого месторождения составляет  $2315 \pm 10$  млн лет и интерпретируется как возраст редкометалльного оруденения [Редкометалльные пегматиты ... , 2017]. Этот возраст предполагает образование этих пегматитов в условиях растяжения земной коры во время раннепалеопротерозойского рифтинга Фенноскандинавского щита [Hanski, Melezhhik, 2013].

Таким образом, Колмозерское литиевое месторождение локализовано в непосредственной близости от трансформационной зоны сдвигового течения (shear zones) на границе крупных блоков земной коры.

*Исследования выполнены в рамках госзадания ГИ КНЦ РАН № 0226-2019-0053.*

#### **Литература**

Spodume from rare-metal pegmatites of the Kolmzero lithium world-class on the Fenoscandian shield: trace elements and crystal-rich fluid inclusions / L. N. Morozova, E. N. Sokolova, S. Z. Smirnov, V. V. Balagansky, A. V. Bazai A. // Mineralogical Magazine. 2020. Vol. 85, Iss. 2. P. 149–160. <https://doi.org/10.1180/mgm.2020.104>

Кольский пегматитовый пояс: основные черты геологического строения / Л. Н. Морозова, П. А. Серов, Е. Л. Кунакузин, Е. С. Бориенко, М. Ю. Сидоров, А. Н. Иванов // Труды ФНС ГИ КНЦ РАН. Апатиты : K&M, 2020. С. 393–397.

Морозова Л. Н. Колмозерское литиевое месторождение редкометалльных пегматитов: новые данные по редкоземельному составу (Кольский полуостров) // Литосфера. 2018. Т. 18, № 1. 18(1) С. 82–98.

Редкометалльные пегматиты Колмозерского литиевого месторождения Арктического региона Балтийского щита: новые геохронологические данные / Л. Н. Морозова, Т. Б. Баянова, А. В. Базай, Л. М. Лялина, П. А. Серов, Е. С. Борисенко, Е. Л. Кунакузин // Вестник КНЦ РАН. 2017. С. 43–52

Hanski E. J., Melezhik V. A. Litho- and chronostratigraphy of the Palaeoproterozoic Karelian formations // Reading the archive of earth's oxygenation. Vol. 2 / V. A. Melezhik (ed.). Berlin : Springer, 2013. P. 39–110.

## **МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИЕ ЧЕРТЫ РУДОВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД ЧАРМИТАНСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ**

**С. Ю. Нематуллаев<sup>1</sup>, А. М. Мусаев<sup>2</sup>, Ф. Б. Каримова<sup>2</sup>,  
Д. И. Джуманиязов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ГУП «Самаркандгеология» Госкомгеологии РУз  
г. Самарканд, Узбекистан

<sup>2</sup> Институт геологии и геофизики им. Х. М. Абдуллаева  
Госкомгеологии РУз, г. Ташкент, Узбекистан  
[sobirjon\\_n\\_y@mail.ru](mailto:sobirjon_n_y@mail.ru)

Минералого-петрографические особенности рудовмещающих пород Чармитанского рудного поля характеризуются тем, что в них традиционное золото-вольфрамовое оруденение сопровождается повышенными содержаниями и редкоземельной минерализацией (Абдуллаев, 1947 г.). Возможность попутной добычи редкоземельных элементов в комплексе и индивидуально имеет промышленное значение. Выясняется схема развития редкоземельной минерализации, определяется формационная принадлежность рудовмещающих пород, изучается их минералого-геохимические особенности, устанавливаются минералы-носители и концентраторы РЗЭ, проводится детальное изучение метасоматитов

Чармитанского рудного поля с расчленением их на фациальные разновидности. Устанавливаются минералогические и геохимические критерии их зональности, выясняется пространственное положение выделенных метасоматических формаций. На Чармитанском месторождении широко развиты метасоматические ассоциации кварц-полевошпатовой, березит-лиственитовой, аргиллизитовой роговиковой и пропилитовой формаций. На юго-восточном фланге месторождения листвениты преобладают над березитами (Мусаев, 2019 г.). Это обуславливает появление среди рудообразующих минералов их экзотических разновидностей, представленных зигенитом и ульманитом. Листвениты сопровождают появление скарновых минералов, таких как андрадит, гроссуляр, везувиан, эпидот и др. В ассоциации с такими минералами встречается шеелит. Это говорит о возможности использования зон лиственитизации как поискового признака на золото-вольфрамовую минерализацию.

В лиственитизированных и березитизированных породах в составе карбоната кальция обнаружены содержащие редкие земли разновидности, количество иттербия в них 0,5–0,8 %, иногда поднимается до 2 %. С учетом легкой извлекаемости редких земель из карбонатов это может представить самостоятельный промышленный интерес.

Критический обзор литературных данных по вещественному составу, динамике развития формаций кварц-полевошпатовых метасоматитов позволил уточнить границы начала и конца проявления этих окolorудных изменений и вычленил из них гумбеитовую и эйситовую самостоятельные формации (Мусаев и др., 2018 г.). Определена их роль в локализации внутренних фаций, переходящих в кварцевые жилы золото-сульфидного оруденения. Подтверждена связь золото-вольфрамовой минерализации с более высокотемпературной стадией кварц-полевошпатового метасоматоза.

Парагенетическая ассоциация в повышенных концентрациях редкоземельной минерализации с поздней стадией березит-лиственитовой формации объясняется механизмом понижения растворимости редких земель и золота в растворах, из которых осаждаются кварцевые жилы (Джуманиязов и др., 2019 г.).

Оценен предположительный уровень продуктивного среднерудного горизонта золото-сульфидного оруденения в пределах 450–500 м на глубину от земной поверхности. В этом горизонте проходит смена березитизированных граносиенитов и ороговикованных песчано-сланцевых отложений нижнего силура лиственитизированными породами (снизу вверх). Эти формации отличаются друг от друга лишь строением кварц-серицитовой – березитовой и кварц-хлоритовой – лиственитовой внутренними фациями.

Вертикальный размах оруденения на месторождении Чармитан, судя по распространенности глинистых минералов аргиллизитовой форма-

ции, сингенетичной с рудообразованием, превышает разведанную глубину – 700–750 м и может достичь 1000 м и более.

В целом преимущественное распространение березитов по граносиенитам и гранитам, а лиственитов – по ороговикованной песчано-сланцевой толще джазбулакской, караташской свит представляет отчетливую закономерность.

## **СНИЖЕНИЕ ИЗБЫТОЧНОЙ УПРУГОЙ ЭНЕРГИИ В ГЛУБИННЫХ СЕЙСМООПАСНЫХ СЕКМЕНТАХ РАЗЛОМОВ ЧЕРЕЗ НАКЛОННО НАПРАВЛЕННЫЕ СКВАЖИНЫ ПУТЕМ ВОЛНОВЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

**В. В. Ружич<sup>1</sup>, А. Г. Вахромеев<sup>1,2</sup>, С. А. Сверкунов<sup>1,2,3,4</sup>**

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский филиал ООО «РН-Бурение», г. Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Иркутский научный центр СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>4</sup> Иркутский государственный технический университет

г. Иркутск, Россия

dobro\_75@mail.ru

Для реализации безопасного снижения избыточной упругой энергии в глубинных сейсмоопасных сегментах разломов [Способ управления режимом ... , 2020; Ружич, 1997] в соответствии с авторским подходом [Способ снижения ... , 2020] производят выделение местоположения напряженных сред, уточнение местоположения высоконапряженного сместителя сейсмоопасной зоны по сейсмогеологическим данным. На основании этих данных проектируют и бурят наклонные скважины нефтяного ряда на достижимые глубины (по вертикали – 6–6,5 км). Сначала проходят пилотный ствол, в котором определяют параметры разломной зоны и устанавливают сейсмодатчики. Далее производят бурение второй скважины по многозабойной конструкции с горизонтальным окончанием каждого бокового ствола, пересекающего отдельный сегмент магистрального тектонического сместителя вкост простирающихся главных систем трещиноватости. При этом крепление основного ствола скважины до начала отхода первого бокового ствола производят эксплуатационной колонной. Далее бурят боковые горизонтальные стволы. При этом после окончания бурения первого бокового выполняют цикл тестирования данного сегмента методом теста «на утечку», с определением давлений и температуры водонапорной системы обводненной разломной зоны в сегменте и давления начала поглощения. Для этого в первый боковой горизонтальный ствол спускают лифтовые трубы с двумя пакерами и многоразовую муфту гидроразрыва пласта между ними, изо-

лируют пакерами участок бокового открытого ствола скважины и выполняют тестирование [Белонин, Славин, Чилингар, 2005; Боровский, 1986]. Затем тестирование повторяют в каждом следующем боковом стволе от ствола к стволу в соответствующем сегменте по мере бурения каждого. Далее заканчивают проходку скважины спуском в основной горизонтальный ствол потайной колонны – фильтр-хвостовика с окнами против каждого входа в боковой ствол и с пакерами, разобщающими эти входные отверстия и расположенными между боковыми стволами с целью перекрытия вскрытых горизонтальным бурением отдельных сегментов сейсмоопасной зоны трещиноватости. Дальнейший цикл плавных волновых гидравлических воздействий на водонапорную систему обводненной зоны дробления выполняют, отсекая гидромеханическими пакерами в основном горизонтальном стволе рабочий интервал воздействий.

Плавное воздействие жидкостью на сегменты сейсмоопасного сместителя через боковые горизонтальные стволы скважины производят последовательно в каждом боковом стволе (от сегмента к сегменту) волновым методом [Проблемы и перспективы ... , 2008] переменных давлений в низкочастотном режиме в интервалы времени, соответствующие расширению напряженных сред, обусловленному влиянием лунно-солнечных приливов, с плавным увеличением давления закачки до 70 МПа к величине начального пластового давления водонапорной системы (но не более величины давления утечки), инициируя плавные смещения крыльев разлома в режиме сдвиговой ползучести. При этом низкочастотный режим подразумевает увеличение давления на уровне бокового горизонтального ствола – 3–12 ч, остановку и фиксацию давления от 3 ч до трех и более суток с подкачкой давления до значения, не более чем на 10 % превышающего достигнутое в первом цикле (3–12 ч). Затем в интервалы времени, соответствующие сжатию напряженных сред, обусловленному влиянием лунно-солнечных приливов, выполняют равномерный плавный сброс давления за 6–12 ч до значения исходного, пластового давления водонапорной системы разломной зоны в сегменте, где 6–12 ч – период времени, кратный солнечно-лунному циклу, т. е. 1/2, 1/3 от периода. Далее операцию повторяют до достижения проектируемого уровня напряженно-деформированного состояния и амплитуд смещений в сегменте, который подтверждают через запись в пилотном стволе с установленными в нем сейсмодатчиками, а на поверхности земли путем измерения в режиме реального времени достигнутого снижения уровня сейсмической активности напряженных сред и суммарных амплитуд индуцированных замедленных смещений в ядре сегмента сместителя разлома. Далее, после цикла волновых воздействий на призабойную зону участка каждого бокового горизонтального ствола, вскрывшего сегмент разломной зоны, изолированной двумя пакерами, закачивают агент с размером фракции 0,1–0,2 мм, снижающий трение.



После этого участок сместителя, на котором волновые гидравлические воздействия отработаны до получения эффекта, консервируется вязкой жидкостью, которая гасит сейсмические колебания, причем в нем выполняют размещение сейсмодатчиков после проведения волновых воздействий давлением для текущего и долговременного контроля глубинной сейсмической активности сегмента магистральной разломной зоны.

#### **Литература**

Белонин М. Д., Славин В. И., Чилингар Д. В. Аномально высокие пластовые давления. Происхождение, прогноз, проблемы освоения залежей углеводородов / под ред. Н. С. Окновой. СПб. : Недра, 2005. 324 с.

Боревский Л. В. Анализ влияния физических деформаций коллекторов на оценку экспл. запасов подземных вод в глубоких водоносных горизонтах // Методы изучения и оценка ресурсов глубоких подземных вод / под ред. С. С. Бондаренко, Г. С. Вартамяна. М. : Недра, 1986. 479 с.

Способ снижения избыточной упругой энергии в глубинных сейсмоопасных сегментах разломов : патент № 2740630 от 02.06.2020 / В. В. Ружич, А. Г. Вахромеев, С. А. Сверкунов, Е. В. Шилько, В. М. Иванишин, Р. Х. Акчурин ; заявка № 2020119008/28(032229) от 02.06.2020.

Проблемы и перспективы волновой технологии многофазных систем в нефтяной и газовой промышленности / Р. Ф. Ганиев, Л. Е. Украинский, В. Е. Андреев, Ю. А. Котенев. СПб. : Недра, 2008. 214 с.

Способ управления режимом смещений во фрагментах сейсмоактивных тектонических разломов : пат. № 2273035 Рос. Федерация / С. Г. Псахье, В. Л. Попов, Е. В. Шилько, С. В. Астафуров, В. В. Ружич, О. П. Смекалин, С. А. Борняков ; заявитель ИФПМ СО РАН, патентообладатели: ИФПМ СО РАН, ИЗК СО РАН. № 2004108514/28(008997) ; заявлено 22.03.2004.

Ружич В. В. Сейсмотектоническая деструкция в земной коре Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 1997. 144 с.

## **РУДОЛОКАЛИЗУЮЩАЯ РОЛЬ РАЗРЫВНОЙ ТЕКТОНИКИ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ОБСТАНОВКАХ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ**

**Ж. В. Семицкий**

Иркутский национальный исследовательский технический  
университет, г. Иркутск, Россия

Многолетнее изучение металлогении и тектоники Восточной Сибири позволяет определить ряд характерных особенностей рудоносности этой территории, включающей крупные металлогенические провинции с богатым комплексом месторождений минерального сырья. Металлогенические провинции здесь отличаются в основном двумя группами характеристик – геодинамическими обстановками и тектоническими особенностями территории. Первые из них определяют характер процессов эндогенного, метаморфогенного, седиментогенного или полигенного рудообразования и металлогенический фон рудных районов, тогда как от

вторых зависят специфические черты формирования, перемещения, концентрации рудоносных флюидов, а также строение рудных поясов, узлов и месторождений. В истории геологического развития региона в разное время проявлялись практически все известные геодинамические обстановки (ГД). В каждой из них значительную роль играют процессы разрывной тектоники и созданные при этом структурные элементы. В зависимости от иерархической принадлежности разломы контролируют и определяют строение различных металлогенических таксонов, что можно показать на ряде примеров.

Прежде всего нужно отметить широкое проявление окраинно-континентальных и субдукционно-коллизионных ГД различного возраста, охвативших приграничную часть Саяно-Байкальской складчатой области в полосе влияния краевых и пограничных разломов. В прибайкальской части (Приморская и Северо-Прибайкальская системы разрывных нарушений) это, например, Западно- и Восточно-Аakitканские разломы и связанный с ними вулканоплутонический пояс протерозойского возраста. Так, в Аakitканском металлогеническом поясе структурно-формационный комплекс (СФК) включает вулканогенные толщи с преобладанием трахитоидного состава и обширные поля гранитоидов. Разрывная тектоника характеризуется развитием крутопадающих протяженных сбросов, сдвигов и сбросо-сдвигов близмеридионального и северо-восточного простирания и пересекающих их коротких сбросов преимущественно близширотной ориентировки. Широко распространены более поздние надвиги, обусловленные движением блоков пород в сторону платформы. Характерно узловое распределение разрывных нарушений, что и определило локализацию восьми рудных узлов с месторождениями и рудопроявлениями гидротермальной урановой, а также флюоритовой и свинцово-цинковой минерализации, в которых преобладают короткие жилы и линзы.

Кроме того, во внутрипластовых и межпластовых зонах трещиноватости и дробления, сопровождающих крупные сбросы и надвиги, локалируются кулисообразно расположенные линзы, гнезда и короткие жилы. Еще одним фактором рудолокализации являются руины древних протерозойских вулканотектонических структур (Савкинский, Кутимский и другие рудные узлы). В присаянской части зона развития разрывных нарушений проявлена в полосе северо-западного простирания между Главным Саянским и Присаянским разломами. Здесь СФК представлен метаморфическими, интрузивными образованиями основного, кислого и щелочного состава, что и определило пестрый состав полезных ископаемых – благородные, редкоземельные, редкие, радиоактивные металлы, полиметаллы, имеющие магматический, карбонатитовый, пегматитовый, гидротермальный генезис. Часть из них концентрируется, например, в пределах Присаянского металлогенического пояса. Определяющими локализацию рудных узлов, жильную и штокверковую формы

рудных тел здесь являются разрывные нарушения – протяженные сбросы и зоны трещиноватости пород, поперечные и продольные по отношению к структурам Главного Саянского разлома. На структурные особенности рудных узлов, месторождений, сложную форму рудных тел влияют также зоны несогласия, строение рудовмещающих интрузивных массивов и другие факторы.

Наиболее широко в Восточной Сибири, особенно в ее юго-восточной части, проявились ГД внутриплитного тектогенеза, которые начали формироваться в позднем палеозое и охватили в мезозое огромные территории к востоку и юго-востоку от оз. Байкал, где в это время развивался Северо-Азиатский суперплюм. Главными структурными элементами этого плюмтектонического этапа были крупные глубинные разломы, контролировавшие размещение вулканоплутонических, терригенных формаций этого СФК. Наиболее типичны металлогенические пояса и зоны в бассейнах рек Шилка и Аргунь, и прежде всего многократно описанный Шилка-Ольдойский пояс, формировавшийся в центральном звене Монголо-Охотской сутуры. С магматическими юрскими и меловыми сериями связаны месторождения золота, молибдена, вольфрама, флюорита, редких металлов, олова. Здесь также главными элементами контроля рудных узлов являются узлы пересечения продольных (северовосточных) и поперечных (северо-западных) разрывных нарушений. Характерно, что последние часто носят скрытый характер и устанавливаются как протяженные разрывные нарушения только при интерпретации физических полей и детальном картировании складчатых и разрывных дислокаций высоких порядков. К ним относится, например, Балейско-Дарасунская зона, протягивающаяся от левобережья Аргуни в бассейн Шилки и Нерчи. На всем протяжении на нее как бы «нанизаны» рудные узлы, приуроченные к пересечениям с продольными северовосточными разрывами (Тулукуевский, Кличкинский, Дарасунский и др.).

Геодинамические обстановки типа древних платформ проявлены в пределах Северо-Азиатского кратона. К примеру, рудоконтролирующая роль региональных разломов видна при рассмотрении строения Ангарской железорудной провинции. Узлы рудовмещающих диатрем локализируются в пределах двух широких дугообразных зон разрывных нарушений близширотного простирания – Тасеевско-Непской и Канско-Кутской, которые формировались в южном обрамлении Тунгусской синеклизы. Локализация этих узлов определяется участками пересечения указанных зон поперечными к ним разломами северо-западного, близмеридионального и северо-восточного направлений. При анализе карт физических полей установлено, что эти нарушения являются глубинными, ограничивают крупные блоки фундамента кратона и фрагментарно проявляются в породах чехла. Простирание этих региональных разломов закономерно меняется с запада на восток провинции по мере смены саянского северо-

западного на прибайкальское северо-восточное направление. В пределах самих рудных узлов формы и строение штокверково-жильных залежей железных руд обусловлены многоактными тектоническими подвижками, происходившими в процессе образования трубчатых структур. В около-трубочном пространстве имели место внутрипластовые движения, что предопределило положение и форму согласных коротких пластообразных залежей. В Северо-Сибирской (Нижне-Енисейской) рудной провинции, приуроченной к пограничной полосе платформы с высокой тектонической подвижностью, также установлена ведущая роль разломов (Норильско-Хараслаха, Северо-Хараслаха и др.) в локализации рудовмещающих интрузивных массивов трапповой формации, а в их пределах – рудных месторождений и тел медно-никелевой рудной минерализации.

## **ОСНОВЫ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОГО ПОДХОДА К АНАЛИЗУ РАЗЛОМНО-БЛОКОВОЙ СТРУКТУРЫ И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ**

**К. Ж. Семинский**

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

Знание закономерностей строения и напряженного состояния осадочного чехла имеет определяющее значение для эффективного поиска и разведки продуктивных залежей на месторождениях углеводородного сырья со сложной структурой. Ключевой проблемой в подобных ситуациях является выбор мест безаварийного бурения скважин в породном массиве, характеризующемся неоднородным напряженно-деформированным состоянием вследствие наличия зон повышенной нарушенности субстрата и участков аномальных пластовых давлений. Задача их достоверного картирования приобретает все большую актуальность по мере исчерпания в мире легко извлекаемых запасов углеводородного сырья. В этих условиях особое значение имеют методы тектонофизики, которые позволяют на основе анализа уникальных по детальности геофизических данных (главным образом 3D-сейсморазведки) выделять разломные зоны, реконструировать напряженное состояние породного массива и определять механизмы его деструкции под действием сил тектонической и гравитационной природы.

В основе тектонофизического подхода лежит широкое понимание разломных зон, к которым относятся не только выраженные тектонитами сместители магистрального типа, но и зоны повышенной трещиноватости, представляющие ранние стадии развития разломов. Именно эти структуры наиболее распространены на месторождениях углеводородов, так как действие однотипной нагрузки в платформенных условиях, как правило, не является настолько интенсивным и длительным, чтобы в чехле сформировались явно выраженные разломные сместители.

Реализация тектонофизического подхода происходит в три главных этапа. На первом из них производится атрибутивный анализ данных 3D-сейсморазведки, в итоге которого в изучаемом объеме выделяется сеть нарушений сплошности пород, разрывная природа которых в отдельных местах заверяется данными документации скважин с привлечением материалов электроразведки и других вспомогательных методов. Далее на основе изучения пространственного распределения этих разрывов в массиве выделяются участки их повышенной плотности – разломные зоны, которые, как правило, образуют замкнутую иерархически построенную – зонно-блоковую – структуру.

На втором этапе производятся работы по определению кинематики разломных зон и восстановлению полей напряжений в блоках. Основой для этого является массив разрывов, выявленных из куба сейсмической информации, а методическим приемом – авторский способ специального структурного картирования (спецкартирования). Он позволяет получить для каждого локального объема решение о стресс-тензоре на основе парагенетического анализа сетей «немых» (не имеющих кинематических маркеров) разрывов. Итогом последующего порангового анализа локальных решений становится реконструкция нескольких (обычно трех-четырех) динамических обстановок, соответствующих главным этапам тектонического развития региона или/и воздействия гравитационных сил.

На третьем этапе производится численное или аналоговое моделирование механизмов структурообразования, характерных для породного массива, вмещающего месторождение. Граничными условиями для его реализации является сеть наиболее крупных из выявленных разломных зон, а также те динамические обстановки, которые по комплексу признаков соответствуют последнему этапу тектонического развития региона. Результаты моделирования, кроме выявления современных механизмов структурообразования, позволяют установить особенности напряженно-деформированного состояния, ответственные за миграцию и накопление углеводородов.

Представленный подход был впервые апробирован на Ковыктинском газоконденсатном месторождении в Восточной Сибири [Тектонофизический подход ... , 2018], которое характеризуется сложным строением осадочного чехла: наличием солевого комплекса в средней части

разреза, послойных срывов и надвигов, валлообразных структур и пр. По окончании работ было показано, что реализация тектонофизического подхода позволяет определить специфику зонно-блокового строения месторождения, установить механизмы разрывообразования под действием тектонических и гравитационных сил, детализировать тип напряженного состояния для отдельных комплексов и всего осадочного чехла, а также провести районирование породного массива по интенсивности и характеру нарушенности разрывами. Эти материалы представляют достоверную основу для построения тектонофизических моделей дислоцированности лицензионных площадей, которые наряду с имеющейся производственной информацией должны быть базовыми при прогнозе условий проходки разведочных и эксплуатационных скважин.

#### **Литература**

Тектонофизический подход к анализу геолого-геофизических данных на газоконденсатных месторождениях со сложным строением платформенного чехла / К. Ж. Семинский, В. А. Саньков, В. В. Огибенин, Ю. П. Бурзунова, А. И. Мирошниченко, Е. А. Горбунова, И. В. Горлов, А. С. Смирнов, А. Г. Вахромеев, И. В. Буддо // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9, № 3. С. 587–627.

**РАЗДЕЛ 5**  
**СЕЙСМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС**  
**В РАЗЛОМНО-БЛОКОВОЙ СТРУКТУРЕ ЛИТОСФЕРЫ**

**ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ АКТИВНОСТИ**  
**ГЕОЛОГИЧЕСКИХ РАЗЛОМОВ**

**П. Н. Александров<sup>1</sup>, Е. А. Баталева<sup>2</sup>, В. В. Бобровский<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Центр геоэлектромагнитных исследований  
Института физики Земли РАН, г. Москва, Россия  
<sup>2</sup> Научная станция РАН, г. Бишкек, Киргизская Республика  
alexandr@igeml.troitsk.ru, bataleva@gdirc.ru

Активность геологических разломов проявляется не только в эмиссии радона и газов, дренаже вод и подобных процессах, но и в генерации источников сейсмического поля за счет процессов трещинообразования в массиве горных пород при высоком уровне упругих напряжений [Response of cracking ... , 2020]. Эти упругие поля регистрируются на дневной поверхности в виде сейсмической эмиссии и имеют форму шумоподобных сигналов, подобных случайным процессам.

К разломам приурочены землетрясения, в связи с чем проблемой является изучение их активности, для решения которой на Научной станции (НС) РАН в г. Бишкеке была разработана градиентная установка [Разработка и опробование ... , 2019] позволяющая фильтровать сейсмическое поле по направлению его распространения на основе выраже-

ния  $\mathbf{v} = -\mathbf{i} \frac{\partial \tilde{f}}{\partial x} - \mathbf{j} \frac{\partial \tilde{f}}{\partial y} - \mathbf{k} \frac{\partial \tilde{f}}{\partial z}$ , где  $\mathbf{i}$ ,  $\mathbf{j}$ ,  $\mathbf{k}$  – орты декартовой систе-

мы координат,  $\tilde{f} = \{S_x, S_y, S_z\}$  – любая компонента вектора смещения  $\mathbf{S} = \mathbf{i}S_x + \mathbf{j}S_y + \mathbf{k}S_z$ ,  $\mathbf{v}$  – вектор скорости распространения упругой волны.

Направление вектора  $\mathbf{n} = \frac{\mathbf{v}}{|\mathbf{v}|}$  позволяет выделять сейсмическое поле распространяющегося субвертикально вверх от источников сейсмического поля эндогенного происхождения (СПЭП). Количественной мерой

активности необратимых процессов в области разлома является энергетическая характеристика СПЭП, вычисленная по направлению его распространения при регистрации поля в течение одного часа. Эта величина позволяет сопоставить ее с происходящими землетрясениями.

На ИС РАН проведены исследования, которые включали измерение сейсмического поля, выделение СПЭП, вычисление энергетической характеристики по одному часу измерений. Полевой эксперимент продолжался более 10 суток. На основе полученных данных проведено сопоставление энергетической характеристики СПЭП с прошедшими землетрясениями. Установлено, что при этом происходит значительный «срыв» в поведении графиков энергетической характеристики СПЭП.

В плане развития данного направления необходимо: совершенствование измерительной аппаратуры; увеличение количества градиентных установок с целью локализации областей активных необратимых процессов; их количественная оценка на основе разделения сейсмического поля на поперечные и продольные волны, которое позволяет количественно определить сдвиговые деформации и деформации сжатия-растяжения на основе вычисления ротора и дивергенции вектора СПЭП.

#### **Литература**

Response of cracking processes in variations of geophysical fields / A. Rybin, E. Bataleva, K. Nepeina, V. Matiukov, P. Alexandrov, P. Kaznacheev // Journal of applied geophysics. 2020. Vol. 181. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104144>.

Разработка и опробование трехкомпонентной градиентной установки для регистрации сейсмоакустического поля в геодинамически активных регионах / П. А. Казначеев, В. Е. Матюков, П. Н. Александров, К. С. Непейна // Сейсмические приборы. 2019. Т. 55, № 1. С. 46–58.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В РАЗЛОМАХ ЛИТОСФЕРЫ**

**С. А. Арсеньев**

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия  
[Artsy7@mail.ru](mailto:Artsy7@mail.ru)

В работе обсуждаются результаты расчетов в очагах, состоящих из двух упруго взаимодействующих блоков. Землетрясение возбуждается при подвижке одного из берегов образующегося или имеющегося разлома. Получено точное решение, описывающее колебания блоков в очаге землетрясения. Показано, что причиной возникающих колебаний являются движение берегов разлома с относительной скоростью  $u$  и неустойчивость типа «отрицательное трение», которая возникает в том случае, если сила трения уменьшается с ростом скорости подвижки [Arsen'yev, 2014; Arsen'yev, Eppelbaum, Meirova, 2019]. Теоретически обоснован



известный в сейсмологии эмпирический импульс Берлаге. Параметры импульса оказались связанными с физическими характеристиками очага землетрясения, и их можно вычислить с помощью теории. Задача расчета возникновения колебаний в очаге землетрясения по его заданным характеристикам поставлена корректно и решена математически. Однако возможна постановка и решение обратной задачи: по записям сейсмических станций вблизи эпицентра землетрясения восстанавливается строение и характеристики его очага. Проведен комплекс расчетов модельного землетрясения с различными скоростями подвижки. Обнаружено возрастание энергии и магнитуды землетрясения с ростом скорости подвижки. Рассчитаны изменения во времени колебаний блоков, расстояния между ними, скоростей и ускорений колебаний, а также энергетика землетрясения: потенциальная, кинетическая и полная энергия, функция диссипации. Показано, что после землетрясения возникают остаточные смещения горных пород и накопление в них потенциальной энергии упругости. Эта энергия может продуцировать последующие афтершоки. Полученные результаты показывают, как «работает машина землетрясений», и объясняют некоторые наблюдаемые особенности проявлений мелкофокусных землетрясений на поверхности Земли: экструзию флюидов и разжижение грунтов, образование трещин и каньонов в области дивергенции блоков, возникновение бугров, холмов и порогов в области конвергенции блоков и другие особенности ландшафта Земли.

#### **Литература**

Arsen'yev S. A. Frictional theory of earthquakes // Actual problems of Humanities and Natural Sciences. 2014. N 4(63), Part 2. P. 300–309.

Arsen'yev S. A., Eppelbaum L. V., Meirova T. Earthquake Processes: A View from Synergetic and the Theory of Catastrophes // Pure and Applied Geophysics. 2019. P. 1–16. <http://doi.org/10.1007/s00024-019-02172-w>.

## **ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ЮГО-ВОСТОКА ЕВРАЗИИ**

**Т. Я. Беленович, Ю. Г. Кутинов, З. Б. Чистова, Н. А. Неверов**

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения

Арктики им. академика Н. П. Лаврова УрО РАН

г. Архангельск, Россия

[kutinov@fciarctic.ru](mailto:kutinov@fciarctic.ru)

Фактическими данными явились определения фокальных механизмов очагов землетрясений с магнитудой  $M = 3,3$  за период 1964–2011 гг. (общее количество которых составило 275) ([http://www.ifz.ru/open\\_data/focal-mechanisms/](http://www.ifz.ru/open_data/focal-mechanisms/); [http://www.ifz.ru/open\\_data/catalog-81-12/](http://www.ifz.ru/open_data/catalog-81-12/)). С исполь-

зованием данных фокальных механизмов очагов землетрясений различных магнитуд за различные периоды времени, на разных глубинных срезах выявлены пространственно-временные закономерности геодинамического режима земной коры Байкальской рифтовой зоны и установлены его устойчивость и закономерности в пространстве и времени.

В работе применялась методика, позволяющая однозначно выражать информацию о механизмах очагов через вектор максимального скольжения (смещения) горных масс [Беленович, 1992].

В целом юго-восточная граница Евроазиатской литосферной плиты в пределах северо-востока Байкальской рифтовой зоны отличается сложным напряженно-деформируемым состоянием и структурно-тектоническим характером земной коры Восточной Сибири. При анализе глубины очагов землетрясений было выделено три участка, которые резко различаются по распределению эпицентров по глубине их залегания и направлению векторов скольжения (смещения) горных масс.

Полученные авторами результаты подтверждают и дополняют данные палеосейсмологии и четвертичной геологии, которые говорят о том, что впадины Байкальской рифтовой зоны формировались и продолжают формироваться в условиях сжатия и, соответственно, не является рифтовыми [Чипизубов, 2015]. Установлено, что перед сильным землетрясением оси сжатия переориентируются во времени и пространстве. На глубинах 15 и 30 км выделены границы раздела, выше и глубже которых происходят землетрясения различных магнитуд: в верхнем слое слабые землетрясения  $M < 5,0$ , в нижнем сильные  $M \geq 5,0$ . Определена граница раздела разнотипных подвижек, которая проходит по центру оз. Байкал. Взбросовые подвижки отмечены к востоку от нее, сбросовые – к западу. Причем западная граница в геодинамическом плане представляет собой зону растяжения, а восточная – зону сжатия.

*Исследования проведены в ходе выполнения госзадания ФГБУН ФИЦКИА РАН АААА-А18-118012390305-7и гранта РФФИ-Арктика (проект 18-05-60024).*

#### **Литература**

Беленович Т. Я. Современная геодинамика Тянь-Шаня по сейсмологическим данным : дис. ... д-ра геол.-минерал. наук / МГУ. М., 1992. 291 с.

Чипизубов А. В. Современная геодинамика Прибайкалья : материалы Междунар. конф. «Геолого-геофизическая среда и разнообразные проявления сейсмичности». Нерюнгри, 23–25 сент. 2015 г. С. 259–266.

## ОЦЕНКА УЯЗВИМОСТИ ЗДАНИЙ С УЧЕТОМ СЕЙСМИЧЕСКОГО ИЗНОСА КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА СЕЙСМИЧЕСКОГО РИСКА

**Ю. А. Бержинский<sup>1</sup>, Л. П. Бержинская<sup>1,2</sup>, А. П. Ордынская<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский государственный научно-исследовательский  
технический университет, г. Иркутск, Россия  
berj.lp@yandex.ru

Сейсмический риск для зданий – это интегральный показатель различных факторов – от сейсмической опасности территории до функций уязвимости самих зданий. Уровень опасности территории определяется близостью расположения населенных пунктов к зонам активных разломов, где высока вероятность проявления сейсмической активности. Существует вероятность и одновременного воздействия на застроенные территории двух или более очагов землетрясений, различных по повторяемости, но сопоставимых по интенсивности сейсмического воздействия. Такую сейсмологическую информацию также учитывают при расчетах сейсмического риска, так как экономический и социальный ущерб от такого воздействия будет существенно больше. Законы разрушения зданий позволяют выявить зависимость между силой возможного землетрясения и вероятной степенью повреждения застройки (физическая уязвимость) согласно сейсмической шкале.

За время жизненного цикла здания в сейсмоактивных районах подвергаются воздействию нескольких сильных, а иногда и разрушительных землетрясений, а количество умеренных и слабых сотрясений исчисляется десятками и сотнями. В процессе деформирования здания при землетрясении происходит накопление внутренних повреждений как в конструкциях, так и в узлах сопряжений. Результатом таких повторяющихся силовых воздействий будет снижение обобщенной жесткости сооружений и увеличение периода их собственных колебаний, при этом масса зданий остается неизменной.

Как свидетельствует опыт обследования последствий землетрясений, суммарные накопления повреждений приводят к постепенным изменениям в конструктивной системе зданий. Подобные результаты прослеживаются и при проведении экспериментальных исследований сооружений, правда, тогда имеется возможность регулировать уровень динамического нагружения, а в случае вибрационного воздействия еще и его продолжительность. Анализ результатов вибрационных испытаний панельных зданий показал, что при увеличении периода собственных колебаний 3-этажного здания серии 135 на 44 % повреждения его конструкций достигли 3–4-й степени. Изменение периода колебаний 10-

этажных блок-секций серии 135 и И-162.02 на 22 и 29 % привело к повреждению соответственно 2-й и 3-й степени по шкале MSK. Это согласуется с данными [Мартемьянов, 1988]: при увеличении периода колебаний на 4–6 % здание получит 1-ю степень, на 20–25 % – 2-ю, а на 40–50 % – 3-ю степень повреждения.

Суммарный эффект накопления повреждений зависит также и от продолжительности нагружения сооружения. Виброграммы ускорений, записанные при испытаниях, показали, что продолжительность колебаний зданий при уровне амплитуды ускорений  $0,5A_{\max}$  в 20–30 с способствует накоплению деформаций в конструктивной системе.

Конечно, повреждаемость зданий при сейсмозрывных и вибрационных испытаниях будет существенно отличаться вследствие различия воздействий по длительности, интенсивности и частотному составу. Испытания двух идентичных фрагментов показали, что хотя инерционные нагрузки при сейсмозрывных испытаниях были в 1,5 раза выше, чем при вибрационных, фрагмент не получил повреждений (0–1-я степень), тогда как повреждения фрагмента при вибрационных испытаниях соответствовали 3-й степени по шкале MSK.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ФОНА С ПОМОЩЬЮ МОДИФИЦИРОВАННОГО СЕЙСМОМЕТРА СМ-ЗКВ ВБЛИЗИ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

**А. Н. Беседина**

Институт динамики геосфер им. академика М. А. Садовского РАН

г. Москва, Россия

besedina.a@gmail.com

Применение специальных методов коррекции датчиков позволяет использовать короткопериодные сейсмометры с расширенным частотным диапазоном в отсутствие широкополосных датчиков для решения широкого круга задач, связанных с регистрацией низкочастотных сигналов. В работе рассмотрена схема коррекции с использованием интегрирующих элементов, которая позволила существенно расширить частотный диапазон сейсмометра СМ-ЗКВ в область низких частот до 0,05 Гц. Синтез передаточной функции схемы коррекции выполнен с помощью двойного интегратора с наклоном АЧХ -12дБ/октава в полосе частот от 0,05 до 0,5 Гц. В лабораторных условиях проведена калибровка модифицированного сейсмометра СМ-ЗКВ-кор. Для проверки границ применимости модифицированного датчика проводилось сравнение результатов регистрации СМ-ЗКВ-кор с записями эталонного датчика Reftek-151–30 по трем типам данных, которые отличаются по частоте и амплитуде:

1) фоновые микросейсмы, 2) промышленные взрывы с характерными частотами более 1 Гц и 3) землетрясения с частотным составом преимущественно ниже 1 Гц. Для анализа микросейсмического шума использовался вероятностный подход. Рассчитанные значения спектральной плотности мощности (СПМ), соответствующие максимумам плотности вероятности распределения для сейсмометра СМ-3КВ-кор, превышают соответствующие значения для Reftek-151–30 на 2–5 дБ для частот 0,1, 1 и 10 Гц и на 22 дБ для частоты 0,01 Гц. В диапазоне частот 0,05–10 Гц, который соответствует рабочему диапазону частот датчика СМ-3КВ-кор, наблюдается устойчивая разница между усредненными значениями СПМ от 2,6 до 6,2 дБ. Для более низких частот разница СПМ увеличивается при уменьшении частоты и достигает значений более 20 дБ на частоте ниже 0,01 Гц.

Для анализа записей промышленных взрывов привлекались данные 37 взрывов, которые были зарегистрированы за время работы временного измерительного пункта, оборудованного широкополосным сейсмометром Reftek-151–30 и датчиком СМ-3КВ-кор, в г. Губкине Белгородской области. Анализ результатов регистрации взрывов проводился в диапазоне частот 1–10 Гц, который содержит основные частоты, генерируемые при взрыве. Коэффициент корреляции, вычисленный для записей всех взрывов, зарегистрированных двумя сейсмометрами, находится в диапазоне от 0,85 до 0,94. Анализ фазовых параметров показал, что присутствует относительно стабильная фазовая задержка 3–4-го отсчета при частоте опроса 200 Гц данных регистрации СМ-3КВ-кор относительно эталонного датчика.

Анализ низкочастотных записей выполнен для семи землетрясений с  $M_w$  от 6,4 до 7,1 на эпицентральных расстояниях от 1400 до 10 тыс. км. Отношение скоростей грунта, записанных двумя датчиками, изменяется в пределах от 0,7 до 2 в диапазоне частот 0,05–1 Гц. Сдвиг фаз изменяется от -34 (СМ-3КВ-кор «опережает» Reftek-151–30) на частоте 0,06 Гц до 10 град (СМ-3КВ-кор «запаздывает» относительно Reftek-151–30) на частоте 1 Гц. Полученные особенности амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик модифицированного датчика СМ-3КВ-кор следует учитывать при проведении сейсмического мониторинга.

*Работа выполнена в рамках госзадания АААА-А19-119021890087-8.*

## СЕЙСМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМЕ РАЗЛОМОВ КУРСКОЙ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ

**А. Н. Беседина, С. Б. Кишкина, Д. В. Павлов, Г. Г. Кочарян**

Институт динамики геосфер им. академика М. А. Садовского РАН

г. Москва, Россия

besedina.a@gmail.com

Построение геомеханических моделей месторождения и прилегающих участков массива горных пород позволяет во многих случаях довольно точно определить вероятные участки локализации деформаций и организовать оптимальную систему мониторинга. В рамках разработанной концепции построения системы мониторинга [Адушкин, Кишкина, Кочарян, 2017] был организован сейсмический и деформационный мониторинг на Коробковском железорудном месторождении Курской магнитной аномалии.

Для организации наблюдений были выбраны участки пересечения разломов северо-западного и северо-восточного простирания, наиболее опасные при отработке. Мониторинг сейсмических событий в этой области осуществлялся квазипериодически в дни проведения массовых взрывов. Источники зарегистрированных сейсмических событий плотно сгруппированы в пространстве вблизи ближайшей взрывной камеры, и большинство находится внутри области с уровнем динамических деформаций от взрывов более  $10^{-6}$ . Судя по полученным данным, источником инициированной сейсмичности являются динамические подвижки амплитудой в 3–30 мкм по трещинам размером от 1 до 10–15 м, что соответствует событиям с магнитудой вплоть до  $-2,7$ . Энергия индуцированных сейсмических событий имеет широкий диапазон значений от  $10^{-3}$  до 1 Дж.

Графики повторяемости последовательностей слабых сейсмических событий имеют типичный вид, соответствующий закону Гуттенберга – Рихтера. Распределение количества сейсмических событий по амплитуде сигнала до и после взрывов имеют сходный наклон, при этом в среднем количество событий, зарегистрированных после взрывов, в 6 раз больше, чем количество событий до взрывов. Полученные результаты могут свидетельствовать о подобию релаксационных процессов в среде при различных видах внешнего воздействия на массив горных пород.

Малое количество сейсмических событий, зарегистрированных в шахте «КМАруда» в период технологических пауз после взрыва, свидетельствует о том, что наблюдаемые сейсмические сигналы связаны с динамическим деформированием массива горных пород сейсмозрывными волнами массовых взрывов. Расположение очагов микроземлетрясений определяется местоположением зарядов взрыва, геометрией разработки и расположением тектонических нарушений.

Наблюдаемые на Коробковском месторождении проявления индуцированной сейсмичности во времени и пространстве соответствуют известным закономерностям для более крупных сейсмических событий, инициируемых удаленными землетрясениями. Полученные результаты позволяют сделать предварительный вывод о невысокой вероятности серьезных геодинамических проявлений при разработке Коробковского месторождения.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 19-05-00378).*

#### **Литература**

Адушкин В. В., Кишкина С. Б., Кочарян Г. Г. Новый подход к мониторингу техногенно-тектонических землетрясений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. № 1. С. 3–14.

## **ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ПРИБАЙКАЛЬЕ**

**С. А. Борняков, Д. В. Салко**

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

В Прибайкалье создана сеть пунктов мониторинга с целью сбора количественной информации о деформациях горных пород для решения теоретических и прикладных вопросов геодинамики и сейсмологии, в том числе для разработки способов прогноза землетрясений.

В 2020 г. на территории Прибайкалья произошли два сильных землетрясения, имеющих разную геодинамическую природу, – Быстринское (21.09.2020,  $K = 14,5$ , координаты: 51.77; 103.40) и Кударинское (09.12.2020,  $K = 13,6$ , координаты: 52.36; 106.60). Очаг первого из них располагался в 20 км к западу от южной оконечности оз. Байкал в зоне сочленения Главного Саянского и Тункинского разломов и развивался в условиях транспрессии с последующей реализацией по сдвиго-взбросовому механизму. Очаг второго землетрясения располагался в зоне Дельтового разлома и развивался в условиях растяжения с реализацией по механизму сброса. Завершающиеся фазы подготовки землетрясений нашли отражение в данных деформационного мониторинга, но проявились избирательно и по-разному.

Признаки Быстринского землетрясения начали появляться за неделю до него в пункте Талая, расположенном в 18 км от его эпицентра, и выразились в изменении тренда деформаций и их увеличении с возрастающей скоростью. После реализации землетрясения рост деформаций сменился их уменьшением с постепенным возвратом к фоновым значениям.

Признаки землетрясения в районе залива Провал зарегистрированы в пунктах Бугульдейка и Приольхонье, расположенных на западном берегу оз. Байкал напротив его эпицентра на удалении 40 км от него и разнесенных друг от друга на 26 км. Несмотря на близкое расположение этих пунктов мониторинга, признаки землетрясения в них проявились по-разному. В пункте Бугульдейка они выразились в синусоидальной реализации деформаций с возрастанием амплитуды колебаний в течение трех недель, предшествующих землетрясению. В пункте Приольхонье деформационный мониторинг проводится в двух точках, разнесенных на 120 м. Первая из них расположена в блоке, вторая – в ограничивающей этот блок зоне разлома. В первой точке визуальных признаков подготовки землетрясения не отмечено, тогда как во второй за десять дней до него начался экспоненциальный рост деформаций, такой же, как в пункте Талая перед Быстринским землетрясением, но отличающийся частной динамикой их развития во времени.

Сходства и отличия проявившихся деформационных признаков подготовки описанных землетрясений объясняются влиянием ряда факторов, таких как геодинамические условия формирования очага, положение относительно него пункта мониторинга, особенности разломно-блоковой структуры участка в пределах пункта, тип пород и др.

Динамика развития деформаций в пунктах Талая и Приольхонье перед Быстринским и Кударинским землетрясениями согласуется с динамикой развития деформаций в модели при подготовке импульсного смещения stick-slip [Ma, Guo, Sherman, 2014]. Это позволяет рассматривать описанное выше аномальное изменение в деформационном процессе в каждом из пунктов мониторинга как один из устойчиво проявляющихся предвестников.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 21-55-53019-ГФЕН) с использованием УНУ «Южно-Байкальский инструментальный комплекс для мониторинга опасных геодинамических процессов».*

#### **Литература**

Ma J., Guo Y., Sherman S. I. Accelerated synergism along a fault: A possible indicator for an impending major earthquake // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2014. Vol. 2. P. 87–99.



## ДИНАМИКА СЕЙСМИЧНОСТИ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ НА БАЗЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

**А. В. Виляев, Ж. Ш. Жантаев**

Институт ионосферы, г. Алматы, Казахстан  
vilayev@gmail.com

Целью исследований является статистическая оценка волновой динамики сейсмичности, которая проявляется в виде сейсмических активизаций и затиший, в том числе в виде периодических сейсмотектонических деформаций земной коры.

Комплекс формализованных параметров представлен выделившейся сейсмической энергией  $E$ , числом произошедших землетрясений  $N$ , сейсмической активностью  $A_{10}$ , рассчитываемыми для узлов регулярной сети  $1 \times 1$  градус в скользящем временном окне 5 лет со сдвигом в 1 год на площади радиусом 0,3 градуса для каждого узла начиная с 1960 г. Использовались данные регионального каталога Института сейсмологии МОН РК.

Оценки сделаны для района, ограниченного широтой  $41^\circ$  с. ш. и  $46^\circ$  с. ш., долготой  $75^\circ$  в. д. и  $81^\circ$  в. д., в который попадает наиболее сейсмоактивная часть юго-восточного Казахстана. Нижний энергетический уровень землетрясений определен как  $K = 9,0$ , что соответствует уровню надежной регистрации для Северо-Тянь-Шанской сейсмоактивной зоны. Оценки выполнены с включением афтершоков.

В динамическом спектре сейсмической активности  $A_{10}$  и кумулятивной энергии  $E$  выделены гармоники 9, 11, 18, 22, 25, 42 года. Из них наибольшей спектральной мощностью обладают 18-летняя (приливной вековой лунный период или же узловой) и 22-летняя (солнечный цикл Хейла – изменение полярности магнитных характеристик Солнца). Выделенный 25-летний период представляет биение взаимных гармоник 18-летней и двойного хейловского. Результаты подтверждены ранее в вариациях механизмов очагов землетрясений на Северном Тянь-Шане и Джунгарии от взбросового типа к сбросо-сдвиговому в связи с 22-летним циклом Хейла [Полешко, Досайбекова, Хачикян, 2016].

Методом фазовых траекторий [Широков, Серафимова, 2006] рассчитаны фазы лунного 18-летнего периода и фазы хейловского цикла для значимых землетрясений региона Средней Азии ( $K \geq 12,0$ ) начиная с 1885 г. Продолжительность и минимумы солнечных циклов получены по данным [SIDC]. За нулевой отсчет фазы лунного цикла приняты эпохи максимального склонения Луны (одна из фаз 1932.00). На фазовой плоскости построено распределение сильных землетрясений с линейной интерполяцией магнитуд для выделения «опасных» временных периодов. Дан предварительный среднесрочный временной прогноз на период 2021–2031 гг. Оценка места возможного землетрясения в данной работе не рассматривалась.

## Литература

Полешко Н. Н., Досайбекова С., Хачикян Г. Я. Вариации механизмов очагов землетрясений на Северном Тянь-Шане и Джунгарии: связь с 22-летним циклом в магнитном поле Солнца // Вестник НЯЦ РК. 2016. Вып. 2. С. 162–165.

Широков В. А., Серафимова Ю. К. О связи 19-летнего лунного и 22-летнего солнечного циклов с сильными землетрясениями и долгосрочный сейсмический прогноз для северо-западной части Тихоокеанского тектонического пояса // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. № 2. Вып. 8. С. 120–133.

SIDC. URL: <http://www.sidc.be/silso/cyclesmm>

## О ПОДХОДАХ К КРАТКОСРОЧНОМУ ПРОГНОЗИРОВАНИЮ СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЗОНЫ АВАЧИНСКОГО ЗАЛИВА (КАМЧАТКА)

**В. А. Гаврилов<sup>1</sup>, А. В. Дещеревский<sup>2</sup>, А. В. Соломатин<sup>1</sup>,  
И. А. Пантелеев<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН  
г. Петропавловск-Камчатский, Россия

<sup>2</sup>Институт физики Земли РАН, г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, Россия  
[vgavr1403@mail.ru](mailto:vgavr1403@mail.ru)

В докладе излагается концепция подхода к решению задачи краткосрочного прогнозирования времени сильнейшего землетрясения, опасного для г. Петропавловска-Камчатского, ожидаемого по данным долгосрочного сейсмического прогноза. Камчатка является одним из самых сейсмоактивных районов мира. Магнитуды камчатских землетрясений достигают величин  $M = 8,5-9,0$ , а средняя повторяемость неглубоких землетрясений с магнитудами  $M \geq 8$  здесь составляет 50–55 лет. По данным последнего долгосрочного сейсмического прогноза, наиболее вероятным местом следующего сильнейшего неглубокого землетрясения по всей Курило-Камчатской сейсмогенной зоне является протяженная сейсмическая брешь в районе от южной части Камчатки до Авачинского залива [Федотов, Соломатин, 2019]. Такое землетрясение в случае расположения его очага в районе Авачинского залива способно вызвать в г. Петропавловске-Камчатском сотрясения до 8–9 баллов. По этой причине своевременный достаточно точный краткосрочный прогноз времени такого землетрясения рассматривается авторами как наиболее актуальная и ответственная задача для настоящего момента.

Предполагается, что краткосрочный прогноз времени землетрясения будет основываться на оценке соответствия изменений основных наблюдаемых параметров геосреды в зоне Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона (ППП) ожидаемому сценарию их изменений, рассчитанному для заключительной стадии подготовки сильного земле-

трясения в районе Авачинского залива. Расчет ожидаемых изменений в характерах и амплитудах регистрируемых геофизических величин предполагается выполнить методами прямого численного моделирования в рамках используемой базовой физической модели подготовки землетрясения. Для мониторинга напряженно-деформированного состояния геосреды в зоне ППП будут использоваться данные сети комплексных скважинных измерений. В настоящее время в сеть входят пять радиотелеметрических пунктов, обеспечивающих восемь видов скважинных геофизических измерений, в том числе геоакустические измерения в скважинах на глубинах до 1012 м, электромагнитные измерения с подземными электрическими антеннами для непрерывного мониторинга удельного электрического сопротивления геосреды и др. Для повышения надежности определения начала заключительной стадии подготовки землетрясения планируется также использовать данные мониторинга состояния ионосферы в зоне ППП.

#### **Литература**

Федотов С. А., Соломатин А. В. Долгосрочный сейсмический прогноз (ДССП) для Курило-Камчатской дуги на VI 2019-V 2024 гг.; свойства предшествующей сейсмичности в I 2017-V 2019 гг. Развитие и практическое применение метода ДССП // Вулканология и сейсмология. 2019. № 6. С. 6–22.

## **ОЦЕНКА ИСХОДНОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ КРАСНОЯРСКА**

**В. И. Герман**<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Красноярский научно-исследовательский институт геологии и минерального сырья, г. Красноярск, Россия

<sup>2</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия  
german3v@yandex.ru

В последние десятилетия происходит пересмотр сейсмической опасности для Красноярска. Так, по карте общего сейсмического районирования ОСР-78 его территория была отнесена к 5-балльной зоне. По карте ОСР-97-А она уже была переведена в 6-балльную зону. На новой карте ОСР-2016-А Красноярск находится на границе 7- и 6-балльной зон с пометкой, что без проведения дополнительных работ по уточнению исходной сейсмичности интенсивность сейсмических воздействий следует принимать равной 7 баллам.

Карты ОСР-97 и ОСР-2016 построены по единой методике, однако модели зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ) у них значительно отличаются. В период между составлением указанных карт для района Красноярска было разработано еще несколько альтернативных моделей

зон ВОЗ: в 2001 г. для ГПКК «КНИИГиМС» такую модель составили специалисты ИЗК СО РАН (далее модель ИЗК-2001), в 2012 г. была составлена модель для карт ОСР-2012, в 2015 г. была опубликована Карта сейсмотектоники Восточной Сибири (ред.: Г. С. Гусев, И. И. Колодезников).

В каждой из перечисленных моделей выделены сейсмолинеаменты, указано их положение, а также оценена максимальная магнитуда  $M_{\max}$  приуроченных к ним землетрясений. Определяющими для оценки сейсмической опасности Красноярска являются ближайшие к нему сейсмолинеаменты, которые относятся к структурам Восточного Саяна. В указанных моделях положение и  $M_{\max}$  таких линеаментов сильно отличаются (табл.), что приводит к различным оценкам исходной сейсмичности для города.

Таблица

Минимальные расстояния от Красноярска до линеаментов с различными максимальными магнитудами  $M_{\max}$  для различных моделей зон ВОЗ

Модель зон ВОЗ	Магнитуда линеаментов $M_{\max}$				
	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
	Минимальные расстояния, км				
ОСР-97	<b>109</b>	317	455	428	637
ИЗК-2001	<b>50</b>	310	91	390	> 500
ОСР-2012	<b>5</b>	40	75	300	> 500
Карта сейсмотектоники Восточной Сибири	<b>2</b>	129	98	> 600	> 500
ОСР-2016	143	124	308	<b>39</b>	581
Предлагаемая модель	154	<b>21</b>	75	112	> 500

Был проведен анализ доступных данных по тектоническому строению региона (включая неотектонику), по выявленным активным разломам и предположительным молодым разрывам, рельефу, параметрам известных палеосейсмодислокаций, региональным и локальным сейсмологическим наблюдениям, геофизическим полям, известным моделям зон ВОЗ. На основе него была предложена новая модель зон ВОЗ (см. табл.). При этом разломы/линеаменты северо-западной части Восточного Саяна вслед за (Бачманов и др., 2017 г.) были разделены на две системы: Канскую с  $M_{\max} = 7,0-7,5$  и ближайшую к Красноярску Ийско-Канскую с  $M_{\max} = 6,0-6,5$ . Оценки исходной сейсмичности для Красноярска, выполненные на основе предложенной модели, оказались близкими к оценкам, полученным по модели зон ВОЗ ОСР-97.

## ПОДОБИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ И ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ

**В. И. Герман**<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Красноярский научно-исследовательский институт  
геологии и минерального сырья, г. Красноярск, Россия

<sup>2</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия  
german3v@yandex.ru

Единый механизм процесса разрушения горных пород на различных масштабных уровнях является физическим основанием теории подобия структуры сейсмичности. Ее базовое утверждение заключается в том, что сейсмичность в одном энергетически-пространственно-временном интервале (ЭПВИ) – масштабная версия сейсмичности в другом ЭПВИ. Это подобие не абсолютное, но статистическое: функция распределения характеристики, рассматриваемой в фиксированном ЭПВИ, – масштабная (сжатая или растянутая по оси ординат) версия базовой функции распределения  $F_0$  [German, 2006; Герман, 2010].

Анализ каталогов сейсмических событий (землетрясений, горных ударов) подтверждает сформулированное утверждение о подобии функций распределения. Для различных ЭПВИ оно наблюдается для временных интервалов между последовательными событиями, минимальных расстояний между ними [Там же]. Распределения характеристик сейсмичности (масштабных, временных, пространственных) хорошо описываются двухпараметрическим семейством распределений [German, 2006; Герман, 2010]. При этом одним из параметров распределений является параметр формы, который от перехода между наборами данных (между ЭПВИ) меняется слабо и связан с фрактальными размерностями (в случае магнитудного распределения таким параметром является тангенс угла наклона графика повторяемости). Вторым параметром является масштабный параметр, который связан с уровнем сейсмической активности для выбранного набора данных (получены простые выражения для его оценки [Там же]). При этом описание характеристик сейсмичности функциями распределения является более общим и более корректным по сравнению с использованием фрактальных размерностей, которые связаны со значением параметра формы распределения.

Распределение временных и пространственных интервалов между последовательными землетрясениями из различных ЭПВИ описывается одним и тем же семейством распределения. Проведенные исследования показывают, что в качестве него может использоваться семейство распределений Вейбулла. Данное семейство распределений также хорошо описывает распределение пространственных интервалов между ближайшими в пространстве сейсмическими событиями из различных ЭПВИ [German, 2006; Герман, 2010].

Аналогично закону Гутенберга – Рихтера подобие распределений временных и пространственных характеристик можно применять для решения ряда задач анализа каталогов землетрясений. В частности, фиксация нарушений такого подобия была использована автором для выявления непредставительных данных (получено согласие с графиком повторяемости). Было также показано, что аномалии в поведении параметра формы распределения временных интервалов для Камчатско-Курильского региона хорошо коррелировали с его тектоническим строением. Предполагается возникновение подобных аномалий в процессе подготовки крупных землетрясений.

#### Литература

Герман В. И. Единая теория подобия структуры сейсмичности: статистический подход. Красноярск : Сиб. гос. аэрокосм. ун-т, 2010. 80 с.

German V. I. Unified scaling theory for distributions of temporal and spatial characteristics in seismology // Tectonophysics. 2006. Vol. 424, N 3–4. P. 167–175.

## СИЛЬНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ПРИБАЙКАЛЬЯ В 2020–2021 ГГ.

**Н. А. Гилева<sup>1</sup>, В. И. Мельникова<sup>1,2</sup>,  
Я. Б. Радзиминович<sup>1,2</sup>, Ц. А. Тубанов<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Бурятский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Улан-Удэ, Россия  
nagileva@crust.irk.ru

В период с сентября 2020 г. по январь 2021 г. в Прибайкалье произошло три сильных землетрясения, каждое из которых стало в своем роде уникальным событием для районов их локализации. Так, Быстринское землетрясение 21.09.2020 ( $M_w = 5,5$ ) (Решение GСMT) зарегистрировано в восточной части Тункинской системы впадин в зоне длительно-го сейсмического затишья. Эпицентр Кударинского землетрясения 09.12.2020 ( $M_w = 5,5$ ) (Решение GСMT) приурочен к разлому, ограничивающему кайнозойский Дельтовый прогиб Усть-Селенгинской депрессии в Центральном Байкале. За инструментальный период наблюдений это событие является вторым случаем (по величине моментной магнитуды) активизации вышеуказанного разлома после Среднебайкальского землетрясения 29.08.1959 ( $M_{LH} = 6,8$ ). Хубсугульское землетрясение 11.01.2021 ( $M_w = 6,8$ ) (Решение GСMT), приуроченное к северной части субмеридионального разлома, ограничивающего западный борт оз. Хубсугул, занимает четвертое место среди сильнейших региональных сейсмических событий инструментального периода наблюдений. Все три землетрясения не имели форшоков, при этом афтершоковый процесс в

их очаговых областях развивался по-разному. Быстринское событие сопровождалось малым количеством афтершоков ( $N < 30$  с  $K_p \geq 6$ ); Кударинское – умеренным (менее 150 событий с  $K_p \geq 6$  в течение полумесяца), в то время как в эпицентральной зоне Хубсугульского землетрясения сетью сейсмостанций БФ ФИЦ ЕГС РАН за первые полмесяца зарегистрировано более 9 тыс. толчков ( $K_p = 6,0-15,7$ ). Достоверные оценки глубин гипоцентров двух первых землетрясений и их афтершоков, полученные в БФ ФИЦ ЕГС РАН, показали, что диапазон их значений  $h = 14-22$  км. Из-за отсутствия близких станций глубины гипоцентров Хубсугульских землетрясений пока не определены. Механизмы очагов главных сейсмических событий и в общей сложности 15 афтершоков ( $K_p \geq 9,0$ ), определенные путем моделирования волновых форм и с использованием знаков первых вступлений  $P$ -волн, показали стабильную сдвиговую и сбросовую составляющие смещений в очаговых областях Быстринского и Кударинского землетрясений соответственно. В районе Хубсугульского землетрясения, очаг которого сформировался в режиме субгоризонтального растяжения, при афтершоковом процессе активизировались разломы различных простираний, при этом в плоскостях разрывов наблюдалась различная кинематика смещений. В целом разрядка напряжений в очаговых областях рассмотренных землетрясений хорошо согласуется с современными представлениями о тектонике районов их локализации. Максимальная наблюдаемая интенсивность сотрясений при рассмотренных землетрясениях оценивается в VI–VII баллов по шкале MSK-64. Все три события сопровождались повреждениями зданий в близкорасположенных населенных пунктах и причинили материальный ущерб. Макросейсмические эффекты землетрясений наблюдались на расстояниях до 1000 км.

В заключение отметим, что изучение сильных землетрясений, кроме решения важных научных задач, направлено на обеспечение безопасности гражданских и промышленных объектов и в первую очередь на предотвращение или смягчение последствий сейсмических воздействий.

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках госзадания № 075-01304-20) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира», а также при финансовой поддержке РФФИ (проект 20-05-00823).*

# ПРОГНОЗ МЕСТ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ОСНОВЕ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ ЛИНЕАМЕНТНО-БЛОКОВОЙ СТРУКТУРЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ

**А. И. Горшков, О. В. Новикова, А. А. Соловьев**

Институт теории прогноза землетрясений и математической  
геофизики РАН, г. Москва, Россия  
gorshkov@mitp.ru

В докладе суммируются результаты многолетнего изучения сейсмоактивных территорий мира с целью распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений [Criteria of high ... , 1972]. Эти исследования показали, что сильные землетрясения приурочены к местам пересечений тектонически активных зон разломов – морфоструктурным узлам. Местоположение узлов устанавливается методом морфоструктурного районирования, а их классификация по степени сеймоопасности производится алгоритмами распознавания образов. С помощью этой методики высокосейсмичные узлы были определены в большинстве сейсмоактивных регионов мира [Gorshkov, Kossobokov, Soloviev, 2003; Распознавание мест ... , 2014; Горшков, 2010]. Землетрясения, которые впоследствии произошли в каждом из изученных регионов, подтвердили достаточно высокую надежность методологии: 87 % последующих землетрясений возникли в узлах, которые ранее были классифицированы как высокосейсмичные [Распознавание мест ... , 2014; Gorshkov, Novikova, 2018].

В докладе представлены результаты применения этой методологии для определения мест возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 6,0$  в Алтайско-Саянской горной области [Gorshkov, Soloviev, 2021].

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 20-05-00171 А).*

## **Литература**

Горшков А. И. Распознавание мест сильных землетрясений в Альпийско-Гималайском поясе. М. : КРАСАНД, 2010. 472 с.

Распознавание мест возможного возникновения землетрясений: методология и анализ результатов / А. А. Соловьев, А. Д. Гвишиани, А. И. Горшков, М. Н. Добровольский, О. В. Новикова // Изв. РАН. Сер. Физика Земли. 2014. № 2. С. 161–178.

Criteria of high seismicity determined by pattern recognition / I. M. Gelfand, Sh. Guberman, M. L. Izvekova, V. I. Keilis-Borok, E. Ia. Ranzman // Tectonophysics. 1972. Vol. 13. P. 415–422.

Gorshkov A., Kossobokov V., Soloviev A. Recognition of earthquake-prone areas // Non-linear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction / Keilis-Borok, V. I., Soloviev, A. A. (eds.). Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2003. P. 239–310.

Gorshkov A., Novikova O. Estimating the validity of the recognition results of earthquake prone areas using the ArcMap // Acta Geophysica. 2018. Vol. 66, N 5. P. 843–853. <https://doi.org/10.1007/s11600-018-0177>

Gorshkov A. I., Soloviev A. A. Recognition of earthquake-prone areas in the Altai-Sayan-Baikal region based on the morphostructural zoning // Russ J. Earth. Sci. 2021. Vol. 21. ES1005, <https://doi.org/10.2205/2020ES000751>.



# ТУПИК РАЗРЫВНОЙ МОДЕЛИ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И РЕАЛИЗАЦИЯ КРАТКОСРОЧНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ НА ОСНОВЕ ДЕГАЗАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

**И. Л. Гуфельд**

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия  
igufeld@kopolev-net.ru

В 2014 г. вышла монография С. И. Шермана «Сейсмический процесс и прогноз землетрясений: тектонофизическая концепция» [Шерман, 2014]. Чуть раньше опубликованы в журнале «Геодинамика и Тектонофизика» две работы по этой же тематике [Гуфельд, Матвеева, Новоселов, 2011; Гуфельд, 2012]. Публикация этих работ была поддержана С. И. Шерманом. Подчеркну, что монография С. И. Шермана представляет колоссальный труд по обобщению и систематизации результатов труда многих и многих исследователей. Здесь не место анализировать результаты обобщения С. И. Шермана. Они представляют огромный интерес для следующих поколений и отражают тупиковое направление, что понимается авторами значительно позже. Фактически не удалось на основе тектонофизической концепции, основанной на лабораторной модели ЛНТ, показать сущность сейсмического процесса и возможные методы его мониторинга, а триггерные эффекты механических деформационных волн с широким диапазоном скоростей нельзя в принципе рассматривать без физического обоснования. Рассматривалась тектонофизика стационарной геологической среды. Геологическая же среда таковой не является.

Тектонофизическая концепция не учитывает перманентную неустойчивость среды, вплоть до глубокофокусных сейсмических событий, связанную с последствиями взаимодействия водородной дегазации с твердой фазой; среду с внутренними источниками энергии различного масштаба; предельную энергонасыщенность геологической среды, не требующей дополнительного накопления упругих напряжений; реальную природу сейсмического акта – подвижку (а не разрыв) элементов среды (блоков) относительно друг друга; отсутствие форшоков как элементов механических представлений о сейсмическом процессе; влияние водородной дегазации на структуру среды и межблоковых границ; чувствительность поверхностных структур к подготовке условий для глубокофокусных событий и многое другое [Гуфельд, 2019].

В [Гуфельд, Новоселов, 2017] представлены принципы мониторинга сейсмической опасности, включая подходы к оценке краткосрочной опасности, на примере зоны субдукции.

В коротком сообщении на круглом столе будут показаны результаты мониторинга фонового состояния среды и перехода среды в критическое состояние, а также будут представлены и прокомментированы по-

следние результаты контроля эпицентральных зон вероятных сильных сейсмических событий, а также триггерных эффектов их возбуждения за счет активизации вертикальных локализованных процессов дегазации.

#### Литература

Гуфельд И. Л., Матвеева М. И., Новоселов О. Н. Почему мы не можем осуществить прогноз сильных коровых землетрясений // Геодинамика и тектонофизика. 2011. Т. 2, № 4. С. 378–415.

Гуфельд И. Л. Геологические следствия аморфизации структуры литосферы и верхней мантии, вызванные водородной дегазацией // Геодинамика и тектонофизика. 2012. Т. 3, № 4. С. 417–435.

Гуфельд И. Л., Новоселов О. Н. Мониторинг состояния среды зоны субдукции. Возможности краткосрочной оценки сейсмической опасности // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. № 2, вып. 34. С. 77–88.

Гуфельд И. Л. Сейсмическая опасность. Предотвратить или предупредить. М. : Сам Полиграфист, 2019. 98 с.

Шерман С. И. Сейсмический процесс и прогноз землетрясения: тектонофизическая концепция. Новосибирск : ГЕО, 2014. 359 с.

## СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ БЫСТРИНСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 21 СЕНТЯБРЯ 2020 Г.

**А. А. Добрынина<sup>1,2</sup>, В. А. Саньков<sup>1</sup>, П. Миалле<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

<sup>3</sup> Подготовительная комиссия Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (CTBTO Preparatory Commission), г. Вена, Австрия  
dobrynina@crust.irk.ru

Быстринское землетрясение 21 сентября 2020 г. с магнитудой 5,4 произошло в 18:04 по UTC; по местному времени это было 22 сентября 02 ч 4 мин. Эпицентр землетрясения находится в 20 км северо-западнее южной оконечности оз. Байкал в зоне влияния Главного Саянского разлома (ГСР).

По записям сейсмических станций Монгольской национальной сети, Бурятского филиала ФИЦ ЕГС РАН, Центра реализации мероприятий по природопользованию и охране окружающей среды Красноярского края и мировых сетей Брюна [Brune, 1970] были оценены очаговые параметры Быстринского землетрясения и его сильнейшего афтершока. При расчетах использовалась стандартная методика определения очаговых параметров по спектру землетрясения, адаптированная для Байкальской рифтовой системы [Добрынина, 2009], и региональные характеристики затухания сейсмических волн [Spatial changes ... , 2016]. Энергия основного толчка оценивается в  $2,28 \cdot 10^{17}$  Н·м (по S-волнам) и в  $6,05 \cdot 10^{16}$  Н·м

(по  $P$ -волнам), моментная магнитуда равна 5,4, размеры очага составляют  $2,10 \times 0,68$  км, смещение в очаге – 8 см, величина сброшенного напряжения –  $3,55 \cdot 10^6$  Па. Для сильнейшего афтершока получены значения сейсмического момента  $2,05 \cdot 10^{15}$  Н·м (по  $S$ -волнам), магнитуда  $M_w = 4,1$ , очаговая область имеет размеры  $0,87 \times 0,29$  км, значения сброшенных напряжений –  $1,27 \cdot 10^6$  Па.

Во многих пунктах во время землетрясения наблюдателями фиксировался сильный гул, что позволило предположить наличие интенсивных акустических волн, излучаемых источниками в районе эпицентра. Ближайшая к эпицентру землетрясения инфразвуковая станция расположена на расстоянии 500 км в Монголии (I34MN). На барограмме, записанной инфразвуковой станцией I34MN, отчетливо проявляются акустические волны, связанные с эпицентрными сигналами от главного толчка и афтершока, а также от вторичных источников, локализованных в горном обрамлении Южно-Байкальской и Быстринской впадин на общей площади  $1200 \text{ км}^2$ . Скорость эпицентральной инфразвуковой волны составляет  $\sim 0,45$  км/с, скорость звука от вторичных источников колеблется в пределах  $0,30$ – $0,35$  км/с. Появление вторичных источников акустических волн вызвано колебаниями горного обрамления впадин при прохождении сейсмических волн. Подобные сейсмоакустические эффекты с появлением вторичных источников инфразвуковых колебаний наблюдались ранее в этом регионе при Хубсугульском землетрясении 5 декабря 2014 г. [Novsgol earthquake ... , 2018; Сейсмоакустические эффекты ... , 2017].

*Работы проводились в рамках проекта № 075-15-2020-787 «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории».*

#### **Литература**

- Brune J. N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // J. Geophys. Res. 1970. Vol. 75, N 26. P. 4997–5009.
- Добрынина А. А. Очаговые параметры землетрясений Байкальской рифтовой системы // Физика Земли. 2009. № 12. С. 60–75.
- Spatial changes of seismic attenuation and multiscale geological heterogeneity in the Baikal Rift and surroundings from analysis of coda waves / A. A. Dobrynina, V. A. Sankov, V. V. Chechelnskiy, J. Déverchère // Tectonophysics. 2016. Vol. 675. P. 50–68.
- Novsgol earthquake 5 December 2014,  $M_w = 4.9$ : seismic and acoustic effects / A. A. Dobrynina, V. A. Sankov, L. R. Тсудыпова, V. I. German, V. V. Chechelnskiy, M. Ulzibat // J. Seismology. 2018. Vol. 22, Is. 2. P. 377–389.
- Сейсмоакустические эффекты Хубсугульского землетрясения 5 декабря 2014 г. с  $M_w = 4,9$  / А. А. Добрынина, В. А. Саньков, В. В. Чечельницкий, Л. Р. Цыдыпова, В. И. Герман // Доклады РАН. 2017. Т. 477, № 6. С. 711–715.

# СЕЙСМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ВПАДИНЫ ОЗЕРА БАЙКАЛ КАК ОТРАЖЕНИЕ РАЗЛОМНО-БЛОКОВОЙ СТРУКТУРЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ

П. Г. Дядьков<sup>1</sup>, М. П. Козлова<sup>1</sup>, А. В. Михеева<sup>1</sup>,  
Ю. М. Романенко<sup>1</sup>, Н. А. Гилева<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН  
г. Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Иркутск, Россия  
dyadkovpg@ipgg.sbras.ru

Разломно-блоковая структура земной коры центральной впадины оз. Байкал и отдельных ее частей рассматривалась в работах многих исследователей [Шерман, Демьянович, Лысак, 2004; Сейсмогеологический анализ ... , 1994; Семинский, 2004; Суворов, Тубанов, 2008; Лунина, Гладков, Шерстянкин, 2010].

Цель данного исследования – выделение пространственных аномалий сейсмической активности для определения разломно-блоковой 3D-структуры земной коры центральной впадины оз. Байкал с выделением асейсмичных элементов. Область детальных исследований включала район от залива Провал до северного окончания о. Ольхон.

Методика предполагала отбор событий с наименьшей погрешностью определения глубины и расчет сейсмической активности для нескольких уровней глубин.

Выявлен не только эффект преобладания событий на глубинах ~15–25 км, что отмечалось многими авторами, но также и эффект латерального расширения площади повышенной сейсмической активности в этом диапазоне глубин. Также наблюдается заглупление верхней границы сейсмоактивного слоя к бортам впадины. Выявлен ряд асейсмичных структурных элементов. Один из наиболее крупных расположен на юго-восточном побережье Байкала и связан с батолитом архейского возраста (Большесухинский выступ Байкальской глыбы), который хорошо выражен на картах аномального магнитного поля ввиду повышенной намагниченности слагающих этот массив гнейсогранитов.

*Работа выполнялась при поддержке проекта ИСГЗ Минобрнауки 0331-2019-0012.*

## Литература

Шерман С. И., Демьянович В. М., Лысак С. В. Сейсмический процесс и современная многоуровневая деструкция литосферы в Байкальской рифтовой зоне // Геология и геофизика. 2004. Т. 45, № 12. С. 1460–1472.

Лунина О. В., Гладков А. С., Шерстянкин П. П. Новая электронная карта активных разломов юга Восточной Сибири // Доклады Академии наук. 2010. Т. 433, № 5. С. 662–667.

Семинский К. Ж. Парагенезис разломов зон растяжения континентальной литосферы // Геология и геофизика. 2004. № 4. С. 443–454.

Сейсмогеологический анализ блоково-разрывной структуры Усть-Селенгинской впадины / Г. И. Татьков [и др.] // Ежегодник-94. Вып. 1. Улан-Удэ, 1994. С. 76–79.

Суворов В. Д., Тубанов Ц. А. Распределение очагов близких землетрясений в земной коре под Центральным Байкалом // Геология и геофизика. 2008. Т. 49, № 8. С. 805–818.

# УТОЧНЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ В РАЙОНЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ

Л. Ю. Епонешникова<sup>1,2</sup>, А. А. Дучков<sup>2</sup>, Ц. А. Тубанов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики

им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Россия

<sup>3</sup>Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

eponesh@gmail.com

Байкальская рифтовая зона (БРЗ) – одна из крупнейших континентальных зон активного рифтогенеза. Она представлена сложной сетью разломов. Центральная часть этой области расположена вдоль оз. Байкал. БРЗ обладает повышенной тектонической подвижностью, которая сопровождается сейсмичностью.

В данной работе изучается сейсмичность в районе центральной части оз. Байкал для понимания особенностей современной тектоники и выделения сейсмогенных разломов. В основе исследования лежит метод локальной сейсмической томографии. Ранее в данном регионе было проведено некоторое количество томографических исследований различных масштабов (глобальная, региональная и локальная томография [Яковлев, Кулаков, Тычков, 2007]). Однако работы разных исследователей могут сильно отличаться друг от друга, совпадая лишь в крупных деталях.

Для проведения томографической инверсии использовались времена вступления (время пробега  $P$ -волн – 6406,  $S$ -волн – 6461) от более чем 800 землетрясений, зарегистрированных 20 станциями (включая временные) Байкальского и Бурятского филиалов ФИГ ЕГС РАН. Каждое событие лоцировалось минимум по пяти станциям. Для обработки данных применялась программа томографической инверсии LOTOS [Koulakov, 2009].

В результате инверсии были получены трехмерные распределения аномалий  $P$ - и  $S$ -скоростей сейсмических волн на разных глубинах. На полученных картах можно отметить хорошую согласованность зон повышенных и пониженных скоростей сейсмических волн с известными данными о геологическом строении Байкальской котловины. Также было проведено сравнение распределения сейсмических источников с сетью активных разломов и газогидратных структур на дне озера [Лунина, 2016].

## Литература

Лунина О. В. Цифровая карта разломов для плейстоцен-четвертичного этапа развития земной коры Юга Восточной Сибири и сопредельной территории Северной Монголии // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7, № 3.

Яковлев А. В., Кулаков И. Ю., Тычков С. А. Глубина Мохо и трехмерная структура сейсмических аномалий земной коры и верхов мантии в Байкальском регионе по данным локальной томографии // Геология и геофизика. 2007. Т. 4, № 2. С. 261–282.

Koulakov I. LOTOS code for local earthquake tomographic inversion: Benchmarks for testing tomographic algorithms // Bulletin of the Seismological Society of America. 2009. Vol. 99, N 1. P. 194–214.

## НОВЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ РАЗМЕРА ОЧАГОВОЙ ЗОНЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

А. Д. Завьялов<sup>1</sup>, О. Д. Зотов<sup>1,2</sup>, А. В. Гульельми<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН

пос. Борок, Россия

zavyalov@ifz.ru

Многочисленные работы посвящены проблеме связи магнитуды землетрясения с пространственными (геометрическими) характеристиками источника (сейсмогенного разрыва в геологической среде). Это, например, такие параметры, как длина разрыва  $L$  по простиранию, ширина  $W$  по падению, площадь  $S$  разрыва, эффективный радиус  $R$ , а также смещение  $D$  по разрыву.

Интерес к данной проблеме имеет как теоретический, так и практический характер. На практике прогноз сильного землетрясения предполагает также и прогноз сейсмической опасности, т. е. уровня сейсмического воздействия на объекты на земной поверхности, для чего необходимо иметь возможность давать оценку геометрических параметров источника (очага землетрясения). С другой стороны, ретроспективное знание взаимосвязи размеров и магнитуд позволяет оценивать последствия будущего возможного землетрясения, в частности параметры ожидаемых разрывов, в том числе и вышедших на поверхность земли. Эмпирические соотношения между параметрами источника и магнитудой позволяют теоретически осмыслить, насколько те или иные модельные представления о процессах в очаге землетрясения соответствуют реальности.

В докладе представлены результаты анализа обобщенных (накопленных) пространственных распределений афтершоковых последовательностей, полученных при изучении большого числа главных толчков в различных диапазонах магнитуд (совокупный объем выборок составляет тысячи главных толчков и десятки тысяч афтершоков). Используются данные мирового каталога землетрясений USGS/NEIC с 1973 по 2014 г. Рассмотрены короткие интервалы времени (не более 10 ч после главного толчка), и расстояния от эпицентра главного толчка до  $5^\circ$ . Исследована зависимость числа повторных толчков от расстояния до эпицентра. Отмечены два свойства пространственного распределения повторных толчков. Первое свойство: максимум кривой, описывающей пространственное распределение афтершоков, наблюдается на определенном удалении (примерно от 10 до 120 км) от эпицентра главного толчка. При этом логарифм расстояния прямо пропорционален магнитуде главного толчка. Второе свойство: положение максимума не зависит от времени, т. е. является стабильной пространственной характеристи-

кой очага. Эти два свойства положены нами в основу определения размера очаговой зоны. Полученное регрессионное соотношение (1) между характерным размером очаговой зоны и магнитудой главного толчка хорошо согласуется с аналогичным соотношением (2) [Ризниченко, 1976]:

$$\lg L_{\text{км}} = 0,43M - 1,27, \quad (1)$$

$$\lg L_{\text{км}} = 0,44M - 1,29, \quad (2)$$

но заметно отличается от формулы, предложенной в работе [Wells, Coppersmith, 1994]:

$$\lg L_{\text{км}} = 0,67M - 2,94. \quad (3)$$

В отличие от своих предшественников мы не анализировали эмпирические данные разных авторов о длинах разрывов, образовавшихся в результате землетрясений с теми или иными характеристиками. Мы использовали данные о землетрясениях, содержащиеся только в указанном выше каталоге. Нас не интересовали индивидуальные особенности пространственных характеристик афтершоковых последовательностей главных толчков, которые, безусловно, различны. Мы сосредоточили внимание на поиске наиболее общих, устойчивых свойств очаговой зоны, используя указанные выше статистические особенности пространственного распределения совокупности афтершоков для совокупности главных толчков.

В результате предложен новый способ определения размера очаговой зоны и получено регрессионное соотношение между характерным размером очаговой зоны и магнитудой главного толчка.

*Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 18-05-00096, а также Программ госзаданий Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН.*

#### **Литература**

- Ризниченко Ю. В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. М. : Наука, 1976. С. 9–27.
- Wells D. L., Coppersmith K. J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // Bull. Seis. Soc. Am. 1994. V. 84, N 4. P. 974–1002.

## СОВРЕМЕННЫЕ ФЛЮИДОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СЕЙСМОАКТИВНОМ РЕГИОНЕ

**Г. Н. Копылова, С. В. Болдина**

Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН  
г. Петропавловск-Камчатский, Россия  
gala@emsd.ru

Авторами выполнено обобщение данных многолетних наблюдений КФ ФИЦ ЕГС РАН (1977 г. – настоящее время) на сети скважин Петропавловск-Камчатского полигона (полуостров Камчатка) на предмет систематизации эффектов в изменениях уровня/давления и химического состава подземных вод в связи с подготовкой землетрясений, влиянием вибрации при прохождении сейсмических волн и другими сейсмотектоническими и вулcano-магматическими процессами [Копылова, Болдина, 2019а, 2019б; Kopylova, Boldina, 2020]. Основное внимание уделяется закономерностям проявления гидрогеологических (гидрогеодинамических и гидрогеохимических) предвестников, оценке возможности их использования для прогнозирования сильных землетрясений и результатам многолетнего сотрудничества с экспертными советами по прогнозу землетрясений, действующими в Камчатском крае.

Установлено, что гидрогеологические предвестники (ГП) проявлялись в течение примерно от 1 до 9 месяцев в нескольких скважинах ( $n \geq 2$ ) перед землетрясениями с величинами магнитуд  $M_w = 6,6-7,8$  на эпицентральных расстояниях  $d_e = 90-200(300)$  км. В районах скважин такие землетрясения сопровождалась сотрясениями с интенсивностью не менее 4–6 баллов по шкале MSK-64, а величины удельной плотности сейсмической энергии составляли от 0,1 до 4,5 Дж/м<sup>3</sup>. Все скважины, в которых проявлялись ГП, были расположены в ближней и промежуточной зонах очагов землетрясений, для которых величины  $d_e/L = 1-3,5$ , где  $L$  – максимальный линейный размер очага землетрясения, км.

С 2002 г. проводится эксперимент по использованию некоторых видов гидрогеологических предвестников в изменениях уровня воды в скважинах для составления еженедельных прогнозных заключений о возникновении сильных землетрясений в районе полуострова Камчатка. Экспертные заключения передавались в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений (КФ РЭС). По оценкам КФ РЭС, на основе ГП в изменениях уровня воды в скважине Е-1 были успешно спрогнозированы шесть землетрясений с  $M_w = 5,3-7,2$ .

Созданные технические средства автоматизированных наблюдений в скважинах и оперативной обработки данных, а также результаты исследования связи ГП с параметрами последующих землетрясений и оценками их потенциального воздействия могут использоваться при разработке научно-технического базиса геоинформационной технологии прогнозирования природных катастроф в Камчатском крае.



## Литература

Копылова Г. Н., Болдина С. В. Гидрогеосейсмологические исследования на Камчатке: 1977–2017 гг. // Вулканология и сейсмология. 2019а. № 2. С. 3–20. <https://doi.org/10.31857/S0205-9614201923-20>

Копылова Г. Н., Болдина С. В. Гидрогеосейсмические вариации уровня воды в скважинах Камчатки. Петропавловск-Камчатский : Камчатпресс, 2019б. 144 с.

Kopylova G., Boldina S. Hydrogeological Earthquake Precursors: A Case Study from the Kamchatka Peninsula // Front. Earth Sci. 2020. Vol. 8. 576017. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.576017>

## СВЯЗЬ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ ШУМОВ С ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ

С. А. Король <sup>1</sup>, А. В. Саньков <sup>1</sup>, А. А. Добрынина <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия  
svetochka\_19961996@mail.ru, dobrynina@crust.irk.ru

Микросейсмические шумы (микросейсм) регистрируются в каждой точке земного шара и содержат информацию обо всех деформационных процессах, происходящих в земной коре на различных энергетических уровнях. Возможность краткосрочного прогноза на основе микросейсм для Байкальской рифтовой системы (БРС) хорошо иллюстрируется примером землетрясения 16.09.2003 (энергетический класс  $K_p = 14$ ,) – за час до события наблюдалось значимое уменьшение уровня сейсмического шума на сейсмостанции Кумора (расстояние до эпицентра 25 км) с минимумом на частоте 6,6 Гц [Черных, Табулевич, 2004]. На основе этих наблюдений в настоящей работе сделана попытка найти краткосрочные предвестники умеренных и сильных землетрясений БРС в поле микросейсм. Алгоритм поиска возможных предвестников заключается в следующем: для каждой сейсмической станции определяется средний спектр микросейсмического шума за текущий год и сравнивается с текущими спектрами 20-минутных участков записей микросейсм за несколько часов до события.

Всего рассмотрено 27 землетрясений с  $K_p = 9,5–15,9$ , произошедших на расстояниях  $\Delta = 3–55$  км. Для расчета среднего спектра на каждой станции использовались данные непрерывной сейсмической регистрации за 1–2 месяца перед землетрясением, для расчетов текущих спектров – записи микросейсм за 1–2 суток перед землетрясением и за сутки после землетрясения.

В результате для 10 событий с  $K_p = 10,1–15,9$  было зафиксировано значительное понижение уровня сейсмического шума перед землетрясением – от 12 мин до 6 ч 45 мин. Эффект понижения уровня микросейсм перед землетрясением установлен для шести сейсмических станций. От-

сутствие предвестника для других станций частично объясняется низким отношением сигнал/шум, где под сигналом понимается предвестник, а под шумом – локальные грунтовые условия в пункте установки сейсмической станции. Часть сейсмических станций сети расположены в местах, характеризующихся значительными сезонными и суточными изменениями частотного отклика верхней части разреза, что объясняется в первом случае сезонными промерзаниями грунтов, а во втором – как приливными и прибойными эффектами на оз. Байкал (некоторые станции расположены вблизи береговой линии), так и наличием сильных техногенных помех (транспорт, ГЭС, железная дорога) [Добрынина, Саньков, Шагун, 2018]. Большую роль при обнаружении предвестника также играют расстояние от приемника до эпицентра землетрясения и энергия землетрясения: с увеличением силы землетрясения растет расстояние, на котором фиксируется предвестник, что объясняется относительно большим размером области подготовки у сильных событий и самого очага будущего землетрясения. Влияние эпицентрального расстояния на возможность фиксации предвестника также значительна. Так, на сейсмостанции Талая наблюдается понижение уровня сейсмического шума перед слабым землетрясением с  $K_p = 10,1$  на расстоянии 3 км, в то время как перед более сильным землетрясением ( $K_p = 12,1$ ,  $\Delta = 27$  км) изменений в частотном составе микросейсм не отмечается.

Зафиксированное понижение уровня микросейсмического шума может классифицироваться как краткосрочный предвестник, связанный с консолидацией среды перед землетрясением. Указанный эффект может быть использован для автоматического определения приближающегося землетрясения на объектах повышенной опасности, располагающихся в сейсмически активных зонах.

*Работы проводились в рамках проекта № 075-15-2020-787 «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории» и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».*

#### **Литература**

Черных Е. Н., Табулевич В. Н. О создании базы данных по сейсмическим шумам // Геодинамика и геологические изменения в окружающей среде северных регионов. Архангельск, 2004. С. 357–361.

Добрынина А. А., Саньков А. В., Шагун А. Н. Сезонные вариации амплитудно-частотных характеристик микросейсмических колебаний по данным сейсмических станций Байкальской сети // Известия Сибирского отделения. Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41, № 3. С. 22–34.

## ЗАРОЖДЕНИЕ И ОСТАНОВКА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

**Г. Г. Кочарян**

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

Вопросы о том, как начинаются землетрясения и когда определяется их окончательный размер – до начала землетрясения или в процессе развития разрыва, продолжают, по выражению J. Gomberg, «ставить в тупик науку о землетрясениях» [Gomberg, 2018].

В обзорном докладе рассматриваются результаты последних двух десятилетий, полученные в этой области как ИДГ РАН, так и другими научными коллективами. Обсуждаются вопросы влияния структуры разломной зоны, геометрии поверхности скольжения, фрикционных свойств геоматериала. Рассмотрена роль *P-T*-условий, строения и свойств зоны динамического влияния разлома.

Продемонстрирована роль медленных движений по разломам в подготовке и иницировании крупных землетрясений.

По данным о расположении очагов, так называемых повторных землетрясений – событий близкой магнитуды, которые происходят практически в одном и том же месте в разные моменты времени, и по результатам GPS-измерений выполнены оценки характерных размеров зон упрочнения (*asperities*). Предложена схема иерархии *asperities* в зоне разлома, которая позволяет отразить важное положение о том, что старт, эволюция и остановка сейсмогенного разрыва определяются наличием областей, обладающих разной динамикой фрикционных характеристик в процессе скольжения, – участков разупрочнения, упрочнения и почти нейтральных по отношению к скорости и смещению. Старт динамического разрыва всегда происходит на участке разупрочнения. Между участками разупрочнения скорость распространения разрыва и скорость скольжения снижается, вновь увеличиваясь на соседних пятнах. При наличии больших участков упрочнения землетрясение вырождается в событие медленного скольжения либо происходит полная остановка разрыва.

Материалы доклада демонстрируют, что в настоящее время наблюдается явная тенденция перехода от исследования отдельных эффектов к изучению взаимодействий подмножеств соответствующих процессов в нескольких пространственных и временных масштабах с целью определения потенциальных взаимосвязей различных явлений. На основе анализа полученных в последнее время результатов и оценки трудностей на пути достижения цели сформулированы некоторые перспективные направления развития геомеханики разломов так, как они представляются автору.

### Литература

Gomberg J. Unsettled earthquake nucleation // Nature Geosci. 2018. Vol. 11. P. 463–464. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0149-x>.

# ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ХУБСУГУЛЬСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ (12.01.2021, $M_w = 6,8$ ) МЕТОДОМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ РСА-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

М. А. Лебедева<sup>1</sup>, В. А. Саньков<sup>1</sup>, А. А. Добрынина<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

levedeva@crust.irk.ru

Хубсугульское землетрясение (12.01.2021,  $M_w = 6,8$ ) явилось вторым по энергии сильнейшим инструментально зарегистрированным сейсмическим событием на юго-западном фланге Байкальской рифтовой системы. Его эпицентр приурочен к западному борту Хубсугульской впадины, многочисленные афтершоки локализованы вдоль правостороннего сбросо-сдвига С-СВ простирания [Новые данные ... , 2003], отделяющего блок п-ова Долон-Ула от горного массива. Глубина гипоцентра землетрясения оценена по данным GСMT в 14,3 км, а механизм очага определен как сбросо-сдвиг с осью сжатия, направленной на СВ, и осью растяжения, направленной на СЗ. Нами получены первые результаты исследований Хубсугульского землетрясения методом дифференциальной РСА-интерферометрии. Применялись радарные данные спутников Sentinel-1В Европейского космического агентства (ESA). Частота повторного пролета этого спутника над одним и тем же объектом составляет 12 дней. Интерферометрическая пара снимков, снятая с нисходящего трека с датами съемки 07.01.2021 и 19.01.2021, характеризует смещения земной поверхности, произошедшие во время землетрясения. Наблюдаемая площадь поверхности, подвергшейся деформации, составляет около 1600 км<sup>2</sup>. Территория с непрерывно наблюдаемыми смещениями простирается от восточного борта Дархатской котловины до западного побережья оз. Хубсугул и от р. Их-Хоро-Гол на севере до р. Ходон-Гол на юге. Кроме того, по обоим побережьям оз. Хубсугул наблюдаются наборы интерферометрических полос, свидетельствующие о том, что деформация захватывает и акваторию. Сигнал терется на водной поверхности озера. Общая длина зоны сейсмогенного разлома, фиксируемая по резкой смене интерференционной картины вдоль линии с простиранием около 350°, составляет 15–16 км. Отсутствие высокоамплитудных смещений, приуроченных к этой линии, позволяет предполагать, что зона слабо выражена на поверхности в виде разрыва или он не достигает поверхности. При этом длина плотного облака афтершоков по данным БФ ФИЦ ГС РАН превышает 50 км.

При длине волн, испускаемой спутниками Sentinel-1, равной 5,6 см (С-диапазон), фазовый набег  $2\pi$  на интерферограмме порождается изменением дальности по направлению к спутнику на 2,8 см. Максимальное

удаление земной поверхности от спутника вдоль линии визирования (LOS) фиксируется на крыльях упомянутого разрыва С-СЗ простирания. Оба крыла удаляются от спутника по LOS. На восточном крыле разрыва смещение по LOS составляет 19,6 см, на западном – 5,6 см. К сожалению, данных с восходящего пролета спутника на территорию исследования в подходящий период времени нет. Поскольку разделение на вертикальные и горизонтальные смещения поверхности затруднено, для примерных оценок возможен расчет смещений, соответствующих изменению дальности до спутника. Так, значению LOS 19,6 см, полученному для восточной части зоны деформаций, соответствует вертикальное смещение 23,6 см либо горизонтальное смещение 35,6 см. Максимум деформаций изолирован и располагается на перешейке между п-ом Долон-Ула и западным берегом озера. По данным монгольских исследователей (Д. Баттогтох, *рег. com.*), здесь отмечаются многочисленные трещины отрыва, а также сдвиги и сбросы с амплитудой первые десятки сантиметров. Для западного крыла разлома полученному значению LOS 5,6 см соответствует вертикальное смещение 6,8 см либо горизонтальное смещение 10,2 см. Известно, что метод дифференциальной интерферометрии наиболее чувствителен к вертикальной компоненте смещений [Hanssen, 2001]. Вклад вертикальной составляющей в смещение по LOS в два с половиной раза больше, чем горизонтальной. При этом необходимо учитывать, что при нисходящем движении спутника горизонтальная составляющая, направленная на юго-восток, играет значительную роль в общем векторе смещений.

Хубсугульское землетрясение (12.01.2021,  $M_w = 6,8$ ) произошло в результате правостороннего сбросо-сдвигового смещения по северному сегменту Хубсугульского разлома вдоль падающей на восток плоскости субмеридионального простирания. Положение главного разрыва не идентифицировано на поверхности, однако в пределах осадочной перемычки п-ва Долон-Ула проявились вертикальные (опускание) и горизонтальные смещения сантиметрового диапазона, приведшие к формированию локальных разрывов. В дальнейшем получение снимков при восходящем движении спутника, математическое моделирование и детальные полевые наблюдения позволят уточнить закономерности проявления деформаций в эпицентральной зоне землетрясения.

#### **Литература**

Новые данные о позднекайнозойских полях напряжений Прихубсугуля (Монголия) / В. А. Саньков, А. И. Мирошниченко, А. В. Парфеев, А. В. Аржанникова // Доклады Академии наук. 2003. Т. 388, № 4. С. 526–529.

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

# ПЕРИОДИЧНОСТИ В СЕЙСМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ И ИХ ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ

Е. А. Левина

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

Как известно, прогноз землетрясений остается до сих пор не решенной наукой задачей. Актуальность же этой проблемы не вызывает сомнений. Некоторые успехи достигнуты в среднесрочном прогнозе (месяцы – годы). Прогноз землетрясений состоит из трех параметров: место  $M$ , энергия  $E$  и время  $T$  ожидаемого события. Наиболее сложно определяемым является параметр  $T$ . Для его уточнения при составлении среднесрочного прогноза землетрясений в Байкальской рифтовой зоне (БРЗ) предлагается использовать периодичности в сейсмическом режиме, выделенные многими исследователями [Выделение периодичностей ... , 1998 и др.]. Одна из проблем на этом пути состоит в том, что эти периодичности являются на самом деле квазипериодичностями, т. е. проявляются не на каждом цикле возбуждающих их сил. Кроме того, для целей прогноза основной интерес представляют процессы со сравнительно короткими для тектонических процессов периодами. Поэтому на роль сил, модулирующих сейсмический процесс, предлагаются годичный цикл обращения Земли вокруг Солнца и 11-летний цикл солнечной активности [Левин, 2006; Sidorenkov, 2009; Ружич, Левина, 2021 и др.]. При расчетах использовался метод наложения эпох, каталог землетрясений БРЗ, предоставленный БФ ФИЦ ЕГС РАН (г. Иркутск), и числа Вольфа за период с 1964 по 2018 г. Для рассмотренных циклов выявлены фазы, на которые приходятся максимумы количества землетрясений или выделившейся сейсмической энергии. В годичном цикле выделяются два максимума – в январе и в июле, что, скорее всего, объясняется особенностями орбитального движения Земли вокруг Солнца: при прохождении Землей перигелия своей орбиты (январь) скорость ее движения максимальна, а в афелии (июль) – минимальна. В 11-летнем цикле для БРЗ главные максимумы сейсмической активности расположены на его нисходящей ветви (седьмой год по энергии и десятый – по количеству). Предполагается, что корреляция солнечной активности с сейсмической активностью Земли объясняется общей причиной, влияющей на оба этих процесса, а именно – возмущающим действием вращения Солнца вокруг барицентра Солнечной системы [Авсюк, 1996]. Таким образом, при учете годичной и 11-летней периодичности в сейсмическом режиме БРЗ обосновывается возможность выделения периодов времени, когда вероятность увеличения количества землетрясений или возникновения сильного землетрясения значительно повышается.

## Литература

Выделение периодичностей в сейсмическом режиме / А. А. Любушин, В. Ф. Писаренко, В. В. Ружич, В. Ю. Буддо // Вулканология и сейсмология. 1998. № 1. С. 62–76.

Левин Б. В. О природе некоторых периодических изменений в сейсмическом режиме Земли // Вестник ДВО РАН. 2006. № 1. С. 51–58.

Sidorenkov N. S. The interaction between Earth's rotation and geophysical processes. Weinheim, WILEY-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, 2009. 305 p.

Ружич В. В., Левина Е. А. Особенности распределения сейсмической активности в разных регионах Земли по фазам 11-летнего солнечного цикла Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, № 1. С. 30–35. <https://doi.org/10.12737/szf-54201901>

Авсюк Ю. Н. Приливные силы и природные процессы. М. : ОИФЗ РАН. 1996. 188 с.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСПОЗИЦИИ И МАСШТАБНОСТИ ОЧАГОВЫХ РАЗЛОМОВ СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ВОСТОЧНОГО КАВКАЗА С VIII В. Н. Э. ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ВЫСШЕЙ ИЗОСЕЙСТЫ МАКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ПОЛЯ

**А. А. Никонов**

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия  
[nikonov@ifz.ru](mailto:nikonov@ifz.ru)

В исследованиях по разломной тектонике и сеймотектонике традиционно используется набор геологических, геофизических и геоморфологических сведений из эпицентральной области крупных событий. Сведения о макросейсмическом поле привлекаются реже. Автор сосредоточился именно на них. Всего на Восточном Кавказе за многие годы (с 1982 г.) автор проработал заново и оцифровал очаговые параметры 16 сильных с  $M \geq 6$  землетрясений. Параметризованы они были после детального обсуждения материалов по каждому событию с Н. В. Шебалиным и затем включены в сводный каталог по Кавказу [Caucasus' test area ... , 1997]. Охвачен период от VIII в. н. э. до XX в. включительно – 1300 лет. В данной работе учтено 10 событий со значениями  $M$  от 6,2 до 7,8. Используются сведения о плановой позиции главной оси макросейсмического поля по простиранию высшей изосейсты, что принято определять как простирание очага и возникшего при данном событии разлома на глубине. Размеры длинных осей событий со значениями магнитуд в указанном интервале магнитуд составляют от первых десятков до 200 км. Соответственно, на карте даже мелкого масштаба они вытягиваются не менее чем в несколько сантиметров. Это меньше реальной длины разрывов в самих очагах и характеризует длину выхода их на земную поверхность. Отчетливо выявлена не беспорядочная ориентировка, а закономерная система разломов. По ориентации оси/разломы разделяют-

ся на три группы. В центре вдоль центральной части Главного Кавказского хребта в направлении с СЗ на ЮВ простирается крупнейший разлом длиной очага 200–250 км сильнейшего Восточно-Кавказского землетрясения 1688 г. Группа из четырех разломов поперечного, также антикавказского, простирания выделяется на ЮВ периферии региона. А на Дагестанском побережье намечился крупный вдольбереговой разлом, ограничивающий Каспийскую впадину.

Для сравнения взята карта «Сейсмогенные зоны Азербайджана и региона Каспийского моря», составленная «на основе выявленных активных узлов и активных блоков. Элементы активной тектоники обоснованы результатами анализа сейсмического режима и геофизических данных» [Панахи, 2003, с. 44], т. е. традиционно. Показаны десятки разломов, продольных и поперечных относительно протяжения Большого Кавказа, сейсмические данные отсутствуют. Неизвестными остаются ранг разломов, их кинематика, глубинность, возраст, а следовательно, и значимость для отражения сеймотектоники, геодинамики и сейсмической опасности.

Полученное нами опосредованно системное, без отклонений, распределение/развертка разломов в проекции на земную поверхность открывает возможность суждения о систематическом воздействии в регионе действующих динамических сил. Геодинамика по полученной развертке однозначно трактуется как главенствующее в регионе давление с юга, с разворотом в свободное пространство к востоку и ВЮВ, на выходе в Каспийскую впадину. Это совпадает с результатами измерений GPS и известными данными о движении к северу Аравийской плиты.

#### **Литература**

Caucasus' test area strong earthquakes catalogue. Historical and Prehistorical Earthquakes in the Caucasus / N. V. Shebalin [et al.]; Eds. Giardini D., Balassanian S. // NATO ASI, Ser. 2. Environment. Dordrecht. 1997. Vol. 28. P. 210–232.

Панахи Б. М. Оценка геологических опасностей и риска Азербайджана // Шемахинское землетрясение 1902 г. Баку, 2003. С. 37–63.



**ОЗОВЫЕ ГРЯДЫ  
КАК СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКИЕ МАРКЕРЫ:  
ДЕФОРМАЦИИ В РЕЛЬЕФЕ И В ПОЗДНЕЛЕДНИКОВЫХ  
ОТЛОЖЕНИЯХ – ОТРАЖЕНИЕ НОВЕЙШЕЙ ТЕКТониКИ  
И ГЕОДИНАМИКИ (НА ПРИМЕРЕ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ  
ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ЩИТА)**

**А. А. Никонов<sup>1</sup>, С. В. Шварев<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт географии РАН, г. Москва, Россия

nikonov@ifz.ru

Углубленные исследования с активным использованием нескольких методов абсолютного датирования отложений, не только органогенных, но и минерогенных, позднеледникового периода последнего ледникового покрова Фенноскандии в разных районах его восточной части позволили сильно продвинуться в познании происходивших в это время экстремальных процессов эндогенного и экзогенного характера.

В отношении флювиогляциальных образований позднеледниковья (гряд и озовых дельт), целиком относимых к этому периоду, ранее отмечалась зависимость от тектонического строения территории [Лукашов, Ильин, 1974 и др.]. Новым оказалось понимание их не только как аккумулятивных построек, но и тесно связанных с разломной тектоникой, унаследованно проявляющейся в фундаменте и в самих телах, т. е. как маркеров и носителей важнейшей с разных точек зрения информации о специфике развития природной среды региона в этот период. Значительное количество следов мощных землетрясений, массово датированных позднеледниковым временем, привело зарубежных исследователей региона к пониманию, что этот период отличался взрывной активизацией разломообразования, сопровождавшегося сильными землетрясениями. Теперь это на нескольких участках российской части Фенноскандинавского щита получило конкретное подтверждение именно по материалам о внутреннем строении, о нарушениях озовых образований и по датировкам.

На двух разобценных опорных участках в Заполярье, в низовьях р. Колы в Мурманской области и в Выборгском районе Ленинградской области, в верховьях р. Вуоксы, в крупных карьерных разработках документированы разломы, пликвативные деформации и следы разжижения рыхлых осадков (liquefaction), квалифицируемые как порождения мощных ( $I \geq IX$  баллов) землетрясений позднеледниковья. Принципиально важно уверенное определение на обоих участках, как и во многих других местах российской части Фенноскандии, по геологическим признакам пространственного и генетического соотношения с зонами крупных древних, протерозойского возраста, разломов. Это вполне подтверждает

предполагающую и выводимую по ограниченным данным связь линейных тектонических структур глубокого заложения с разрывами близ поверхности, новейшими, унаследованными.

Так, в важнейшей проблеме молодого разломообразования осуществляется переход от двумерного пространства к трехмерному и даже четырехмерному (во времени). При великом множестве озовых образований на востоке Фенноскандии и системности их расположения заключение принципиально значимо, открывает новые перспективы в изучении сейсмотектоники, сейсмичности и геодинамики всего региона.

#### Литература

Лукашов А. Д., Ильин В. А. Озы и тектонические нарушения // Новейшие и современные движения земной коры восточной части Балтийского щита. Петрозаводск, 1974. С. 43–46.

## **КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ: ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ ВОЗДЕЙСТВИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК И МАГНИТНЫХ БУРЬ НА ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЗЕМНОЙ КОРЕ**

**В. А. Новиков<sup>1</sup>, Ю. Я. Ружин<sup>2</sup>, В. М. Сорокин<sup>2</sup>, А. К. Яценко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, г. Троицк, Россия  
novikov@ihed.ras.ru, sova@izmiran.ru

Полученные к настоящему времени результаты исследований возможной взаимосвязи вариаций параметров космической погоды и сейсмичности Земли являются неопределенными, а в ряде случаев – противоречивыми, что исключает возможность сделать однозначный вывод о наличии либо отсутствии такой связи, а тем более практически использовать эти результаты для решения проблемы снижения сейсмической опасности. Все это обусловлено тем, что предыдущие работы основаны только на статистическом анализе рядов регистрации параметров солнечной или геомагнитной активности и каталогов землетрясений (ЗТ) без детального рассмотрения физических моделей взаимосвязи процессов в системе «солнце – магнитосфера – ионосфера – атмосфера – литосфера» и анализа их влияния на деформационные процессы в земной коре, включая инициирование землетрясений. В настоящей работе сделана попытка создания физической модели воздействия ионизирующего излучения солнечных вспышек (СВ) на очаги землетрясений с ее последующей проверкой в лабораторных экспериментах и полевых условиях. Рассмотрен один из возможных механизмов инициирования ЗТ: воздей-

ствии на сейсмогенный разлом земной коры возмущений электрического поля, электрического тока и тепловыделения в разломе, обусловленных поглощением ионизирующего излучения СВ [Sorokin, Yashchenko, Novikov, 2019] либо магнитными бурями. Численными экспериментами показано, что в результате крупномасштабного в горизонтальном направлении возмущения проводимости нижней области ионосферы в присутствии внешнего электрического поля возможна генерация возмущений геомагнитного поля в диапазоне периодов единицы – десятки секунд. Амплитудно-временные характеристики сигнала определяются возмущением интегральных проводимостей ионосферы. В зависимости от соотношения между интегральными проводимостями Холла и Педерсена возмущенной ионосферы может наблюдаться осциллирующий и аperiodический режимы магнитных возмущений. Для сильных возмущений проводимости ионосферы амплитуда пульсаций может достигать  $\sim 10^2$  нТл. Получено, что даже кратковременные геомагнитные пульсации, вызванные рентгеновским излучением сильных солнечных вспышек класса X [Sorokin, Yashchenko, Novikov, 2019], а также геомагнитными бурями с  $Kp > 8$  [Novikov, Sorokin, Yashchenko, 2020], могут генерировать геомагнитно-индуцированные токи (ГИТ) в очагах землетрясений, плотность которых ( $10^{-6}$  А/м<sup>2</sup>) сопоставима с плотностью тока, генерируемого искусственным источником ( $10^{-7}$ – $10^{-8}$  А/м<sup>2</sup>), который инициирует слабые ЗТ [Zeigarnik et al., 2018].

Таким образом, подтверждается гипотеза об электромагнитном механизме инициирования ЗТ при сильных вариациях космической погоды. Дальнейшее изучение отклика сейсмичности на сильные солнечные вспышки и геомагнитные бури должно быть сконцентрировано на поведении проводящих разломов, ориентированных соответствующим образом для индукции ГИТ с максимальной амплитудой, на которых в соответствии со средне- и долгосрочным прогнозом ожидаются сильные землетрясения.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Государственного фонда естественных наук Китая в рамках научного проекта № 21-51-53053.*

#### **Литература**

- Sorokin V. M., Yashchenko A. K., Novikov V. A. // Earthq. Sci. 2019. Vol. 32. P. 26–34.  
Novikov V. A., Sorokin V. M., Yashchenko A. K. // Ann. of Geoph. 2020. Vol. 63, N 5. PA554.  
Zeigarnik V. A. et al. // Geoph. Res. Abstr. 2018. Vol. 20. EGU2018–15436-1.

# ЗАКОНОМЕРНОСТИ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ГИПОЦЕНТРОВ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В ПЛОСКОСТИ ТЕКТОНИЧЕСКОГО РАЗЛОМА

**А. А. Остапчук, М. Ф. Попов, Г. Г. Кочарян**

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

Установление закономерностей формирования и эволюции очага землетрясения является критически важным для прогнозирования и управления сейсмическим режимом. Согласно современным представлениям, основным механизмом инициирования землетрясений в приповерхностной зоне земной коры является фрикционное скольжение вдоль разломов [Кочарян, 2016]. Описание высокочастотного движения в ближней зоне очага землетрясения показывает сильную неоднородность полей смещения и сброса напряжений вдоль плоскости разрыва. В плоскости разлома выделяются особые зоны локализации напряжений, так называемые асперитис, в окрестности которых косейсмические смещения максимальны, а вклад сейсмической составляющей в тектоническую деформацию близок к единице. В настоящей работе на основе высокоточного сейсмического каталога Северной Калифорнии (<https://www.ldeo.columbia.edu/~felixw/NCAeqDD/>) исследуется структура зоны локализации очагов землетрясений, приуроченных к разломам Сан-Андреас и Калаверас.

Для рассмотренных разломов типа сдвиг гипоцентры землетрясений локализуются в узкой центральной зоне, формирующей поверхность шириной от 0,4 до 1,3 км ( $1 \dots 5 \cdot 10^{-2}$  от длины). В плоскости разлома отчетливо прослеживается тенденция локализации гипоцентров в непосредственной близости друг от друга. Распределение гипоцентров в плоскости разлома характеризуется сильной пространственной кластеризацией, проявляя зоны формирования асперитис. Характерное расстояние между зонами асперитис составляет для различных разломов от 1 до 5 км. Вследствие процессов самоорганизации геосреды кластеры асперитис обладают статистическим самоподобием [Bak, Tang, 1987]; и косейсмический разрыв, зарождаясь на одной и той же асперитис, может охватывать различный масштаб [Okuda, Ide, 2018]. Коэффициент подобия асперитис для различных сегментов разломов варьируется от 0,7 до 1,6.

## Литература

- Кочарян Г. Г. Геомеханика разломов. М. : ГЕОС, 2016. 424 с.  
Bak P., Tang C., Weisenfeld. Self-Organized Criticality: An Explanation of 1/f Noise // Physical Review Letters. 1987. Vol. 59, N 4. P. 381–384.  
Okuda T., Ide S. Hierarchical rupture growth evidenced by the initial seismic waveforms // Nature Communications. 2018. N 9. 3714. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06168-3>.

## ЭКЗОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ДОЛИНАХ РЕК СЕНЦА И ЖОМБОЛОК (ВОСТОЧНЫЙ СЯН)

В. А. Пеллинен<sup>1</sup>, С. В. Алексеев<sup>1</sup>, Е. А. Лебедева<sup>2</sup>,  
А. А. Светлаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Институт географии РАН, г. Москва, Россия

vadim.a.pellinen@ya.ru

Объектами исследования являются экзогенные формы рельефа, развивающиеся в днище и бортах долин рек Жомболок и Сенца, в их нижнем течении на Окинском плоскогорье.

В долине р. Жомболок преобладают склоновые процессы, а именно осыпи и курумы. В настоящее время на лавовый поток опираются обширные конусы выноса притоков реки, сложенные преимущественно селевым материалом. Всего отмечено 80 таких конусов общим объемом около 210 млн м<sup>3</sup>; наиболее крупные из них расположены на участках среднего и нижнего течения, где они занимают от 15 до 25 % площади днища долины. Скорость денудации в бассейнах левых притоков р. Жомболок за 13 тыс. лет составила почти 24 мм/тыс. лет. В настоящее время активность селевых процессов невелика, о чем свидетельствует задернованность и залесенность рассматриваемых конусов. Пик селеформирования отвечает началу голоцена. Рост конусов вызывал заполнение рыхлым материалом лавовых пустот, что препятствовало подлавовому стоку, способствовало формированию озер в днище долины и смещению русла реки.

В целом полученные нами цифры несколько больше скорости денудации, рассчитанной для хр. Кропоткина за период юры – миоцена по результатам трекового анализа апатитов [Лунина, 2016], которая составила 17,5 мм/тыс. лет. С конца плиоцена начался период неотектонической активизации региона, что повлияло на возрастание скорости денудации в речных бассейнах по периферии воздымающегося блока хр. Кропоткина, обрамленного зонами активных разломов. На поверхности разломы выражены в виде многочисленных зон дробления и трещиноватости, вследствие чего коренные породы в бассейнах водотоков сильно дезинтегрированы. Активному проявлению гравитационных процессов способствует и высокая сейсмичность территории. Окино-Жомболокский разлом относится к наиболее активным структурам региона. Амплитуда смещений по нему в голоцене составила 60–70 м, а средняя скорость смещения, соответственно, 6–7 мм/год. К зоне разлома приурочены и современные (происходившие с 1900 г.) землетрясения магнитудой 4,1–5. Сейсмогравитационные деформации могут развиваться уже при магнитуде 4,2, причем зона сейсмического воздействия мо-

жет распространяться на расстояние до 300 км от эпицентра. В результате сейсмических толчков, помимо обвалов, усиливаются также оползневые, лавинные процессы, активизируется и сход селей [Геологическая карта ... , 1967; Лебедева, 2016; Лунина, 2016; Лунина, Андреев, Гладков, 2014; Смекалин, Чипизубов, Имаев, 2010].

Бассейны небольших притоков практически целиком попадают в приразломные зоны повышенной трещиноватости, где материал на склонах подготовлен к транспортировке. У более крупных водотоков непосредственно в зоне разлома находятся лишь их приустьевые части. Однако в их долинах на спутниковых снимках хорошо дешифрируются значительные объемы ледникового материала. Они сформировали конусы выноса преимущественно за счет его переотложения, о чем свидетельствует хорошая обработка в них валунов и гальки. Конусы выноса таких притоков, как правило, более крупные, местами они практически перекрывают днище долины р. Жомболок. Соответственно, в периоды паводков и Жомболок, и его притоки их размывают и уносят часть материала, который впоследствии принимает участие в формировании аллювия основной реки. Объем этого материала при расчетах не учитывался, т. е. реальные скорости денудации в крупных водотоках явно несколько выше, и мы можем считать полученные данные лишь среднеминимальными темпами денудации.

В отличие от Жомболока, в долине р. Сенца наблюдается большое количество стариц и озер, что свидетельствует о перегруженности долины осадочным материалом. Отложения аллювиального, озерного, гляциального, делювиального и пролювиального генезиса представлены суглинками, супесями, песками, галечниками, валунами. Мелкозернистые отложения, сформировавшиеся в озерных котловинах и речной долине при низких скоростях течения воды, явились благоприятной средой для активизации процессов пучения поверхности поймы и террасы р. Сенца в период многолетнего промерзания [Литология и строение ... , 2017]. В результате режимных наблюдений установлено, что береговая линия отступает на 0,31 м в год.

В бортах долины р. Сенца также отмечается большое количество курумов, осыпей и обвалов, а в днище развиваются такие процессы, как криогенное пучение и боковая эрозия. В пределах нижнего течения в днище долины, в 680 м на северо-запад от пос. Шаснур, выделены два полигона с максимальным развитием бугров пучения. Первый полигон покрыт лесным массивом, что оказывает сильное влияние на развитие геокриологических процессов, замедляя процесс протаивания и оттаивания, граничит со старичными озерами с северо-востока и запада, а также с р. Сенца на юге. Второй полигон представлен открытой поверхностью, ограниченной с запада старичным озером, которое в период поднятия уровня более чем на 1 м соединяется с р. Сенца.

В общем на обоих полигонах все крупные бугры отстоят друг от друга на расстояния 100–150 м. Этим буграм свойственна большая высота – от 5,1 до 6,5 м. Более мелкие бугры на исследованном участке имеют несколько меньшую высоту и объединены в группы по 3–5 бугров. Большая высота бугров связана со значительными запасами влаги для пучения. Участки затопления и близость к озерам и реке можно рассматривать как один из факторов, увеличивающих высоту бугра.

Дальнейшие исследования, накопление и обработка полученных данных позволят дать прогнозную оценку распространения и развития различных экзогенных процессов в пределах долин нижнего течения рек Жомболок и Сенца.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 20-45-380002 p\_a, а также проекта РФФИ № 18-05-00967 а.*

#### **Литература**

Литология и строение бугров пучения в долине р. Сенца (Окинское плоскогорье, Восточные Саяны) / С. В. Алексеев, Л. П. Алексеева, А. А. Светлаков, Е. А. Козырева, Ю. К. Васильчук // Арктика и Антарктика. 2017. № 2. С. 136–149.

Геологическая карта: N-47-XXVIII. Геологическая карта СССР. Восточно-Саянская серия. Масштаб: 1:200000 / под ред. Арсентьев В. П. Л. : Ленинградская картфабрика объединения, 1967.

Лебедева Е. В. Влияние лавовых потоков на строение долин и развитие речной сети // Геоморфология. 2016. № 3. С. 78–91.

Лунина О. В. Цифровая карта разломов для плиоцен-четвертичного этапа развития земной коры юга Восточной Сибири и сопредельной территории Северной Монголии // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7, № 3. С. 407–434.

Лунина О. В., Андреев А. В., Гладков А. А. Закономерности проявления и модели локализации опасных геологических процессов при сейсмогенной активизации разломов на юге Сибири и в Монголии // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, № 8. С. 1294–1313.

Смекалин О. П., Чипизубов А. В., Имаев В. С. Палеоземлетрясения Прибайкалья: методы и результаты датирования // Геодинамика и тектонофизика. 2010. № 1. С. 55–74.

## ВНУТРЕННЕЕ ПОГЛОЩЕНИЕ И РАССЕЯНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН В ЛИТОСФЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ СИСТЕМЫ

П. А. Предеин<sup>1,2</sup>, А. А. Добрынина<sup>1,3</sup>, Ц. А. Тубанов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

<sup>2</sup> Бурятский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Улан-Удэ, Россия

<sup>3</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

crmpeter@gmail.com

Представлены результаты исследования особенностей затухания короткопериодных поперечных сейсмических волн (оценка относительного вклада рассеяния на неоднородностях среды ( $Q_{SC}$ ) и внутреннего затухания ( $Q_i$ ) в общее затухание) в литосфере центральной части Байкальской рифтовой системы: Южно-Байкальской впадины и обрамляющих ее территорий Сибирской платформы и Забайкальского блока. Для анализа выбраны 670 землетрясений с магнитудой  $M \geq 2$ , зарегистрированных на 15 станциях Бурятского и Байкальского филиалов ФИЦ ЕГС РАН на расстояниях от 20 до 70 км. Использован метод разделения компонент  $Q_{SC}$  и  $Q_i$  для поперечных  $S$ -волн с помощью инверсии огибающей коды [Sens-Schönfelder, Wegler, 2006], реализованный в программе Qopen [Eulenfeld, Wegler, 2016].

Расчет величин  $Q_i$  и  $Q_{SC}$  для рассматриваемого региона показал, что в большинстве случаев больший вклад в общее затухание дает внутреннее затухание. Полученные результаты расчетов хорошо согласуются с данными, полученными другими методами в работе [Spatial variations ... , 2019]. Анализ пространственных вариаций компонент затухания показал, что исследуемая область Южно-Байкальской впадины делится на две большие части – южную (до дельты р. Селенги) и центральную. Южная часть во всех диапазонах частот обладает относительно меньшим вкладом рассеяния  $Q_{SC}$  в общее затухание, вместе с тем эта область характеризуется большим общим затуханием по сравнению с центральной частью Байкальской впадины [Spatial variations ... , 2019]. Высокое затухание сейсмических волн в южной части Южно-Байкальской впадины обусловлено в большей степени вкладом внутреннего затухания, что может отражать меньшую нарушенность среды разломами относительно Центрального Байкала. Как показано в [Там же], положение областей повышенного и пониженного затухания может определяться различиями в свойствах земной коры и верхней мантии: повышенное затухание в южной части Байкальской впадины может быть связано с пониженной плотностью земной коры [Кайнозой Байкальской ... , 2001], а также с вероятным флюидизирующим воздействием мантийной аномалии, установленной по данным сейсмотомографии [Evidence for small-scale ... , 2003]. В центральной части наблюдаются значительные



вариации вклада обеих компонент в общее затухание как по простиранию, так и вкрест простирания впадины. Сопоставление пространственного распределения затухания в различных частотных диапазонах показало, что наибольший относительный вклад в рассеяние наблюдается для низких частот – 1,5–3 Гц, что соответствует характерным размерам блоков земной коры порядка 1–3 км. При этом области повышенного рассеяния  $Q_{SC}$  совпадают с областями повышенной плотности эпицентров.

#### Литература

- Sens-Schönfelder C., Wegler U. Radiative transfer theory for estimation of the seismic moment // *Geophysical Journal International*. 2006. Vol. 167, N 3. P. 1363–1372.
- Eulenfeld T., Wegler U. Measurement of intrinsic and scattering attenuation of shear waves in two sedimentary basins and comparison to crystalline sites in Germany // *Geophysical Journal International*. 2016. Vol. 205, N 2. P. 744–757.
- Spatial variations of seismic wave attenuation in the South Baikal basin and adjacent areas (Baikal rift) / A. A. Dobrynina, P. A. Predein, V. A. Sankov, Ts. A. Tubanov, D. P. -D. Sanzhieva, E. A. Gorbunova // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2019. Vol. 10, Is. 1. P. 147–166. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-1-0408>
- Кайнозой Байкальской рифтовой впадины: Строение и геологическая история / В. Д. Мац [и др.]. Новосибирск : Изд-во СО РАН, филиал Гео, 2001. 252 с.
- Evidence for small-scale mantle convection in the upper mantle beneath the Baikal rift zone / S. S. Gao, K. H. Liu, P. M. Davis, P. D. Slack, Y. A. Zorin, V. V. Mordvinova, V. M. Kozhevnikov // *Journal of Geophysical Research*. 2003. Vol. 108(B4). P. 2194.

## МАКРОСЕЙСМИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ КУДАРИНСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 9 ДЕКАБРЯ 2020 Г. ( $M_w = 5,5$ ) НА СРЕДНЕМ БАЙКАЛЕ

**Я. Б. Радзиминович<sup>1,2</sup>, Н. А. Гилева<sup>2</sup>, Ц. А. Тубанов<sup>3,4</sup>,  
О. Ф. Лухнева<sup>1</sup>, А. В. Новопашина<sup>1</sup>, Л. Р. Цыдыпова<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>3</sup>Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

<sup>4</sup>Бурятский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Улан-Удэ, Россия

ian@crust.irk.ru

9 декабря 2020 г. в 21<sup>h</sup>44<sup>m</sup> по Гринвичу (10 декабря в 5 ч 44 мин по местному времени) в дельте р. Селенги произошло сильное землетрясение ( $M_w = 5,5$ ), по местоположению эпицентра получившее название Кударинское. За период инструментальных сейсмологических наблюдений (с 1960 г.) в рассматриваемом районе известно только одно землетрясение с близким значением магнитуды, произошедшее 28 марта 1970 г.

Кударинское землетрясение ощущалось на большой площади и причинило материальный ущерб в ближней к эпицентру зоне. Информация об ощутимых эффектах была собрана силами Байкальского и Бурят-

ского филиалов ФИЦ ЕГС РАН, при этом использовались два основных способа получения данных. Во-первых, с помощью онлайн-анкетирования населения Южного Прибайкалья были получены сведения из 120 населенных пунктов Иркутской области и Республики Бурятия (1414 откликов). Во-вторых, сотрудниками Бурятского филиала ФИЦ ЕГС РАН было выполнено оперативное полевое обследование в 28 населенных пунктах ближней зоны. В результате установлено, что Кударинское землетрясение проявилось с максимальной наблюдаемой интенсивностью VI–VII баллов по шкале MSK-64 (с. Кудара,  $\Delta = 16$  км); в пунктах, расположенных в ближней зоне на расстояниях до 47 км, интенсивность сотрясений колебалась от V до VI баллов. Некоторые здания в селах Кудара, Корсаково, Оймур, Посольское, расположенных в районе дельты р. Селенги, получили повреждения 1-й и 2-й степени. Макросейсмические эффекты, соответствующие V баллам, были отмечены на расстояниях от 22 до 253 км, в том числе в крупных городах (Улан-Удэ, Иркутске, Ангарске, Шелехове, Усолье-Сибирском). Сотрясения интенсивностью IV балла наблюдались на расстояниях до 570 км. Максимальная дистанция, на которой были заметны макросейсмические эффекты, составляет  $\Delta = 982$  км (г. Красноярск, II балла).

Анализ макросейсмических данных о Кударинском землетрясении позволил выявить эффект повышенной интенсивности сотрясений в некоторых районах Прибайкалья. В частности, в г. Иркутске и его окрестностях, а также в пунктах, расположенных в долине р. Ангары, наблюдаемая интенсивность сотрясений на I–II балла превышала значения, ожидаемые по региональному макросейсмическому уравнению. Ранее подобная аномалия неоднократно фиксировалась при других сейсмических событиях с эпицентрами в районе дельты р. Селенги, включая сильнейшее историческое Цаганское землетрясение 12 января 1861 г. ( $M = 7,5$ ), Среднебайкальское (29 августа 1959 г.,  $M = 6,8$ ) и Усть-Селенгинское (10 октября 2001 г.,  $M = 4,8$ ) землетрясения, а также событие 28 марта 1970 г. ( $M = 5,5$ ).

Отдельно следует отметить реакцию населения Южного Прибайкалья. Землетрясение, произошедшее рано утром, вызвало у очевидцев сильный испуг, в особенности у жителей крупных городов. Некоторые после землетрясения в панике выбегали на улицу, опасаясь повторных толчков. Землетрясение спровоцировало широкий резонанс в СМИ и социальных сетях, что в определенной мере усилило панические настроения в обществе. Острая реакция, а также последующее длительное чувство страха и неуверенности у очевидцев позволяют сделать вывод о низком уровне готовности населения Южного Прибайкалья к чрезвычайным ситуациям природного характера.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 20-05-00823).*

# СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ГЕОМЕХАНИКИ И ТЕКТОНОФИЗИКИ В ОЦЕНКЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

**Ю. Л. Ребецкий**

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

В начале создания методов прогноза сильных землетрясений исследования базировались на теории упругой отдачи Рэйда и явлении стик-слипа на разломе. Эти взгляды не привели к значимым успехам не только в практической области, но и оказались не способными к развитию теории обсуждаемой проблемы. В частности, они не могут ответить на вопрос, сформулированный Ю. Ю. Каган: если крупное землетрясение происходит только тогда, когда напряжения достигают прочности горных пород, то почему небольшие землетрясения происходят в сейсмогенной зоне постоянно? Из этого факта исследователь делает вывод, что в сейсмогенных зонах постоянно существует много участков, в которых достигается предел прочности породы. В то же время землетрясения, происходящие в них, долго не становятся спусковым механизмом крупного землетрясения. Вероятно, в зоне разлома должны быть особые условия, при которых небольшое землетрясение превращается в очень большое. Ю. Ю. Каган также обратил внимание на необходимость объяснения причин не только зарождения очага землетрясения в данном конкретном месте, но и того, почему землетрясение завершается на определенном участке разломной зоны, хотя ее продолжение также является сейсмогенным.

Сама постановка таких вопросов заставляет нас предполагать существование неоднородности напряженно-деформированного состояния при подготовке крупных землетрясений. Отсюда вытекает необходимость разработки детерминированного подхода при изучении состояния сейсмогенных зон. То есть мы возвращаемся к тем вопросам, которые выделяли в проблеме прогноза Г. А. Гамбурцев и его коллеги еще в 50-х гг. прошлого века, – роль внутреннего строения и физического состояния разломов.

К сожалению, среди сейсмологов и геофизиков сохраняется представление о повышенной опасности регионов с высоким уровнем максимальных касательных напряжений. Высокий уровень касательных напряжений действительно необходим для образования хрупкого разрушения, но если на этой плоскости действует высокий уровень нормальных напряжений сжатия, то разрушения может не произойти. Поэтому в геомеханике давно известно, что за хрупкое разрушение отвечают кулоновы напряжения, представляющие собой разность действующих на разрыве касательных и нормальных напряжений, помноженных на коэффициент трения. При этом нормальные напряжения следует рассматривать

как эффективные, учитывающие роль флюидного давления в терцинно-поровом пространстве. Для возникновения хрупкого разрыва более опасны напряжения среднего и даже низкого уровня. Дж. Райсом было отмечено, что сильные землетрясения не должны попадать в область высоких уровней напряжений, так как здесь на плоскостях разрыва наблюдается высокий уровень трения, на преодоление которого уйдет большая часть высвобождаемой энергии.

В настоящее время выполнено множество теоретических расчетов для проверки различных моделей развития хрупкого разрушения в условиях, приближенных к природным, т. е. применительно к унифицированному строению субдукционных зон напряжений. В них используют представления о зависимости трения от скорости перемещения и состояния (Rate&State) среды в разломной зоне. В рамках этой теории исследуется возможность трансформации медленного скольжения в динамическое (сейсмические события) за счет падения прочности в процессе асейсмического скольжения. Было показано, что в субдукционных зонах возможно формирование расширяющихся областей медленного скольжения, которые возникают в зонах первоначально высокого уровня напряжений.

## **О ДЕМПФИРОВАНИИ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЗАКАЧКАМИ РАСТВОРОВ В СЕГМЕНТЫ РАЗЛОМОВ ЧЕРЕЗ ГЛУБОКИЕ СКВАЖИНЫ**

**В. В. Ружич<sup>1</sup>, А. Г. Вахромеев<sup>1,2</sup>, С. А. Сверкунов<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия  
Ruzhich@crust.irk.ru

Термин «демпфирование» используется авторами в контексте принудительного снижения больших амплитуд сейсмических колебаний на серии многочисленных слабых путем применения контролируемых низкоэнергетических воздействий для управления режимами скольжения в высоконапряженных сегментах разломов. Такой подход основан на результатах проведенных натурных экспериментов в разломах, а также на анализе новых данных, полученных при петрофизическом изучении образцов горных пород из зон палеосейсмодислокаций, эксгумированных с глубин 12–18 км. В последнем случае была выяснена важная роль природных многоактных инъекций глубинных газо-водных флюидов в сегменты активных разломов. Возникающие условия впрыскивания флюидов в разломы способствовали изменениям режима скольжения, а при определенных условиях и запуску высокоскоростных косейсмогенных смещений [A new way ... , 2007; О формировании очагов ... , 2018 и др.].

При проведении натуральных экспериментов в 2004–2006 гг. на участках зон Ангарского и Приморского разломов с участием ведущих ученых России и зарубежья (ИЗК, ИГД, ИФПМ и др.) была подтверждена возможность путем виброимпульсных динамических воздействий в сочетании с закачками растворов через скважины инициировать в режиме ускоренной сдвиговой ползучести генерации многочисленных безопасных слабых микроземлетрясений. Таким путем удавалось обеспечивать безопасную разгрузку избыточной эндогенной упругой энергии на многие годы [A new way ... , 2007 и др.]. В ряде публикаций российских и зарубежных ученых представлены сходные доводы в пользу реальности применения методов демпфирования опасных землетрясений путем воздействия на участки разломов вибрациями и закачкой растворов в сейсмоопасные участки разломов [О возможности перевода ... , 2006; Наведенная сейсмичность ... , 2009; Rinaldia, Rutqvist, 2019]. В сообщении обсуждаются способы разгрузки высоконапряженных участков разломов с применением современной технологии глубокого бурения на 5–7 км и инъекции специальных растворов через группы наклонных и горизонтальных скважин. При этом важно соблюдать и контролировать режим деформационно-волнового гидродинамического влияния на высоконапряженные участки повышенного контактного трения [Об управлении режимами ... , 2020]. При проектировании подобных воздействий предварительно уточняются сведения о геологическом строении зон разломов, их морфогенетических типах и направленности смещений, а также угла падения плоскостей скольжения. Для дальнейшей практической реализации рассматриваемого проекта важно проведение полномасштабного тестирования с бурением глубокой скважины и проведением режимных закачек в сегмент активного разлома. Приоритет идеи демпфирования опасных землетрясений и полезность способа ее техническое решение подтверждается патентным решением ГК РФ от 17.04.2020.

### Литература

- A new way to manage displacements in zones of active faults / Psakhie S. G. [et. al.] // Tribology International. 2007. Vol. 40, N 6. P. 995–1003.
- О формировании очагов землетрясений в разломах на приповерхностном и глубинном уровне земной коры. Часть II. Глубинный уровень / В. В. Ружич, Г. Г. Кочарян, В. Б. Савельева, А. В. Травин // Геодинамика и тектонофизика. 2018а. Т. 9, № 3. С. 1039–1061. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3>
- О возможности перевода динамики смещений в блочных средах в режим ползучести / А. Э. Филиппов, В. Л. Попов, С. Г. Псахье, В. В. Ружич, Е. В. Шилько // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32, вып. 12. С. 77–86.
- Наведенная сейсмичность и возможности регулируемой разрядки накопленных тектонических напряжений в земной коре / К. М. Мирзоев, А. В. Николаев, А. А. Лукк, С. Л. Юнга // Физика Земли. 2009. № 10. С. 49–68.
- Rinaldia A. P., Rutqvist J. Joint Opening or Hydroshearing? Analyzing a Fracture Zone Stimulation at Fenton Hill // Geothermics. 2019. Vol. 77. P. 83–98. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.08.0063>
- Об управлении режимами сейсмической активности в сегментах тектонических разломов с применением вибрационных воздействий и закачки растворов через скважины / В. В. Ружич, А. Г. Вахромеев, Е. А. Левина, С. А. Сверкунов, Е. В. Шилько // Физическая мезомеханика. 2020. № 3. С. 54–69. <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2020-13006>.

## СЕЙСМОПРОГНОСТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ В БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЕ

**В. В. Ружич, Е. А. Левина, Е. И. Пономарева**

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

Многолетние авторские исследования в создании междисциплинарного подхода к средне- и долгосрочному прогнозу очагов землетрясений с  $K = 13-17$  на территории Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) ориентированы на разработку многопрофильных методов обеспечения сейсмической безопасности, включая прогноз землетрясений. Начатый в Институте земной коры в 1988 г. сейсмопрогностический мониторинг в пределах Байкальской рифтовой зоны основывается на применении ГИС [Ружич, 1997; Левина, Ружич, 2011]. Регулярная количественная обработка оперативных каталогов землетрясений, поступающих от БФ ФИЦ ЕГС РАН в г. Иркутске, позволяет в режиме мониторинга анализировать вариации различных параметров сейсмичности на разных стадиях подготовки очагов умеренных и сильных землетрясений, начиная с  $K \geq 13$ . Для анализа сейсмических процессов при мониторинге на территории БРЗ привлекаются сведения о процессах контактного трения и газозаводного флюидного насыщения разрывных нарушений, а также других геомеханических условиях, способствующих возникновению очагов землетрясений в глубинных сегментах сейсмоактивных разломов [Оформировании очагов ... , 2018]. Накопленный опыт комплексного анализа тектонофизических и геодинамических условий возникновения очагов опасных землетрясений в пределах БРЗ позволяет с наибольшей достоверностью выявлять районы подготовки очагов землетрясений по параметру место  $M$ . Данный параметр с позиций геомеханики визуализируется на картах как проекция на земную поверхность высоконапряженных сегментов зон разломов (или разломных узлов), часто сопряженных с сейсмическими брешами. Они по геолого-структурным критериям рассматриваются как высоконапряженные прочностные барьеры, препятствующие скольжению в зонах разломов. За 2019 и 2020 гг. попадание в цель составило 67 и 82 %. Выявленные потенциально сейсмоопасные районы на регулярно представляемых в МЧС сейсмопрогностических картах показаны вместо абстрактных точечных эпицентров участками территории, ограниченными изосейстами пяти сейсмических сотрясений. Последние вычисляются на основании прогнозируемых энергетических оценок  $E$  в энергетических классах ожидаемых землетрясений, которые хорошо ощутимы человеком. Наиболее трудный для диагностики параметр время  $T$  определялся с учетом выявленной по каталогу цикличности с длительностями 0,5–1,0 года, 11 лет и полувеко-

вой. Параметры  $T$  и  $E$  в практических приложениях определяются с меньшей точностью в сравнении с параметром  $M$  из-за недостатка необходимой сейсмометрической, деформометрической и других типов геофизической информации о напряженно-деформированном состоянии породных массивов и режимах скольжения в участках разломов. Для их получения нужны более плотная сеть сейсмических станций и современное техническое оснащение приборами с высокой разрешающей способностью. Существующая на сегодня в БРЗ ситуация представляет интерес для регионального МЧС в рамках среднесрочного прогноза землетрясений. Востребованность прогнозируемого параметра  $M$  в том, что возникает возможность своевременно применять разрабатываемые технологические мероприятия для смягчения негативных последствий землетрясений, ожидаемых в ближайшие годы [Об управлении режимами ... , 2020].

#### **Литература**

Ружич В. В. Сейсмоструктурная деструкция в земной коре Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 1997. 144 с.

Левина Е. А., Ружич В. В. Новое программное обеспечение для анализа сейсмического режима и разработки среднесрочного прогноза землетрясений // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии. Иркутск : ИЗК СО РАН, 2005. Вып. 3. С. 204–207.

О формировании очагов землетрясений в разломах на приповерхностном и глубинном уровне земной коры. Часть II. Глубинный уровень / В. В. Ружич, Г. Г. Кочарян, В. Б. Савельева, А. В. Травин // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9, № 3. С. 1039–1061. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3>.

Об управлении режимами сейсмической активности в сегментах тектонических разломов с применением вибрационных воздействий и закачки растворов через скважины / В. В. Ружич, А. Г. Вахромеев, Е. А. Левина, С. А. Сверкунов, Е. В. Шилько // Физическая мезомеханика. 2020. № 3. С. 54–69. <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2020-13006>.

## **АКТИВНЫЕ РАЗЛОМЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПРИБАЙКАЛЬЯ В ПОЛЕ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ**

**А. В. Саньков<sup>1</sup>, А. А. Добрынина<sup>1,2</sup>, В. А. Саньков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия  
[dobrynina@crust.ir.ru](mailto:dobrynina@crust.ir.ru)

Проведено изучение строения зон крупных активных разломов Южного Прибайкалья с использованием методов микросейсмического профилирования, а также осуществлена оценка анизотропных свойств зон разломов на основе частотного и поляризованного анализа микросейсм. Метод микросейсмического профилирования является одной из модификаций метода спектральных отношений горизонтальных и вертикальных компонент ( $H/V$ -отношения) Накамуры [Nakamura, 1989]. Спе-

цифика метода позволяет говорить о его применимости для выделения зон разломов, поскольку метод нацелен на выделение субвертикальных неоднородностей, в силу того что волны Рэлея распространяются параллельно поверхности (Цуканов, Горбатилов, 2015). Метод оценки анизотропии в зонах разломов базируется на вкладе собственных колебаний в зоне разлома в частотную составляющую микросейсмического шума и смене его поляризационных характеристик [Horizontal polarization ... , 2012 и др.].

Микросейсмическое зондирование зон разломов осуществлялось методом поперечного профилирования. Расстояние между станциями составляло от 25 до 50 м, а количество станций на профиле варьировалось в зависимости от предполагаемой ширины зоны разлома. При обработке для каждого полученного участка записи выбиралось от нескольких десятков до сотен окон (длиной не более 25 с). В окончательный расчет включались только те окна, для которых отношение  $STA/LTA$  лежало в пределах 0,5–2,0 (здесь  $STA$  и  $LTA$  – средние уровни амплитуды сигналов для короткого (1 с) и длинного (25 с) временных периодов). Итоговые кривые  $H/V$ -отношений и соответствующие значения стандартных отклонений получались осреднением индивидуальных  $H/V$ -отношений для всех окон. Полученные наборы амплитудно-частотных характеристик использовались для построения разрезов через зоны разломов. По амплитуде и форме аномалий на двумерных разрезах  $H/V$ -отношений оценивалось строение среды под профилем, форма фундамента, положение и угол падения разлома, а также ширина его зоны.

Поляризационный анализ выполнялся для всех точек измерения в частотном диапазоне от 5 до 15 Гц, с тем чтобы охарактеризовать верхнюю часть разреза. Исследования проведены на примере зон активных Тункинского, Главного Саянского и Приморского разломов. Особое внимание уделялось участкам со следами голоценовой сейсмогенной активизации – палеосейсмодислокациям. Поляризационные диаграммы в горизонтальной проекции «север-юг – запад-восток» часто показывают резкую смену направления усиления колебаний микросейсмических волн непосредственно в зоне разлома. Обнаружено, что в зонах сейсмогенных сбросов максимум амплитуд колебаний направлен поперек простирания главного сместителя и параллельных ему сбросов второго порядка и трещин отрыва. В зонах сейсмогенных сдвигов колебания усиливаются чаще всего нормально к ориентации трещин отрыва и реже поперек главного сместителя разлома. На неактивизированных участках разломов, даже при наличии мощных зон тектонитов, эффект поперечной поляризации отсутствует. Такое различие поля микросейсмических колебаний дает возможность качественно оценивать положение сегментов разломов, подвергшихся сейсмогенной активизации в недавнем прошлом.



## Литература

Цуканов А. А., Горбатилов А. В. Метод микросейсмического зондирования: влияние аномальных значений коэффициента Пуассона и оценка величины нелинейных искажений // Физика Земли. 2015. № 4. С. 94–102.

Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface // QR Railw. Tech. Res. Inst. 1989. Vol. 30. P. 25–33.

Horizontal polarization of ground motion in the Hayward fault zone at Fremont, California: dominant fault-high-angle polarization and fault-induced cracks / M. Pischietta, F. Salvini, J. Fletcher, A. Rovelli, Y. Ben-Zion // Geophys. J. Int. 2012. Vol. 188, N 3. P. 1255–1272.

## ПРИЧИНЫ ВАРИАЦИЙ КОНЦЕНТРАЦИЙ РАСТВОРЕННОГО ГЕЛИЯ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ ПРИБАЙКАЛЬЯ

Р. М. Семенов<sup>1,2</sup>, М. Н. Лопатин<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения  
г. Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия  
Semenov@crust.irk.ru

Известно, что концентрации растворенного гелия в подземных водах периодически испытывают заметные вариации. Считается, что обусловлены они различными причинами: тектоническими, приливными силами, изменениями атмосферных явлений, техногенными процессами и др. В связи с этим мы провели расчеты зависимости концентраций гелия в подземных водах Прибайкалья, обусловленной изменениями различных эндогенных и экзогенных данных. Установлено, что прямых корреляционных зависимостей между вариациями концентраций гелия и некоторыми атмосферными процессами не выявлено. В то время как накануне подземных толчков фиксируются заметные вариации в концентрациях гелия в подземных водах. Причем зависят они от энергии землетрясений и их эпицентральных расстояний от пунктов гидрогеохимических наблюдений. При этом в расчет принимаются землетрясения, условная энергетическая характеристика которых в пункте гидрогеохимических наблюдений составляет  $K' \geq 5,0$  [Значение гидрогеохимических ... , 1985; Геохимические методы ... , 1992]. Это их свойство используется в качестве прогностических признаков во многих сейсмоактивных регионах, и в том числе в Прибайкалье [Семенов, Кашковский, Лопатин, 2017]. Чаще всего в расчетах учитываются подземные толчки оперативных каталогов землетрясений с  $K \geq 9,0$ . Но, как оказалось, и землетрясения с  $K \leq 9,0$  способны влиять на изменения концентраций гелия в подземных водах, если их очаги располагаются близ пунктов гидрогеохимических наблюдений.

Используя каталог землетрясений БФ ГС СОРАН с энергетическим классом  $K < 9$ , мы выбрали землетрясения, которые с учетом их эпицентральных расстояний проявлялись в пунктах гидрогеохимических наблюдений с  $K' > 5,0$ . Для примера мы рассмотрели 10 землетрясений с  $K = 7,6-8,5$ , эпицентры которых располагались на удалении от 4 до 15 км от водозабора Листвянка, а их условная энергетическая характеристика составляла от 5,1 до 6,5 в пункте водозабора. Было установлено, что накануне нескольких подземных толчков в концентрациях гелия также отмечались повышения их концентраций. Кроме этого, мы проверили, не являлись ли эти подземные толчки форшоками более сильных землетрясений в этой зоне, с подготовкой которых наблюдались зафиксированные вариации содержания гелия.

*Исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ (проект 20-05-00357 А).*

#### **Литература**

Значение гидрогеохимических методов для краткосрочного прогноза землетрясений / В. Л. Барсуков, Г. М. Варшал, А. В. Гаранин, Н. С. Замокина // Гидрогеохимические предвестники землетрясений. М. : Наука. 1985. С. 3–16.

Геохимические методы прогноза землетрясений / Барсуков В. Л. [и др.]. М. : Наука, 1992. 213 с.

Семенов Р. М., Кашковский В. В., Лопатин М. Н. Гидрогеохимический предвестник землетрясений в Южном Прибайкалье // Геология и геофизика. 2017. № 12. С. 1955–1963.

## **СЕЙСМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РАЗЛОМОВ ОЧАГА МОГОДСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В ГОЛОЦЕНЕ ПО ПАЛЕОСЕЙСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ**

**О. П. Смекалин, А. В. Чипизубов, В. С. Имаев**

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

Фрагменты Хулжингольского и Тулэтского разломов, вскрытых при Могодском землетрясении (05.01.1967,  $M_s \sim 7,5$ ), расположены в пределах разбитого на блоки Орхон-Селенгинского прогиба, характеризующегося молодым рельефом и наличием сеймотектонических дислокаций, выявленных за несколько лет до землетрясения [Нацаг-Юм, Балжинням, Монхо, 1971]. С целью определения активности разломов на протяжении голоцена могодские дислокации были изучены нами в разрезах канав. Сейсмологами установлено, что очаг Могодского землетрясения имел сложный характер многократного вспарывания, осуществившегося в виде серии толчков [Москвина, 1978]. В работе [Huang, Chen, 1986] процесс вспарывания делят на три подсобытия, которые последовательно

шли с севера на юг, и для первых двух подсобытий механизм определяется как правосторонний сдвиг. Третье подсобытие имеет ярко выраженную взбросовую компоненту. Определенно взбросовый механизм имеет и наиболее сильный из афтершоков (20.01.1967, Ms~7,0), эпицентр которого приближен к южной, Тулэтской, ветви могодских дислокаций, а обе нодальные плоскости имеют северо-западное простирание, как и Тулэтский разлом. Эпицентр этого афтершока практически совпадает с эпицентром одного из альтернативных решений для третьего подсобытия главного толчка Могодского землетрясения. При этом в указанной работе и во многих других публикациях дислокации Могодского землетрясения рассматриваются принадлежащими единому разлому (разрыву), у которого близ южного фланга простирание плавно меняется с субмеридионального на юго-восточное. Однако по космическим снимкам (а также при наземном обследовании) устанавливается, что и Хулжингольская, и Тулэтская ветви дислокаций практически прямолинейны вплоть до их пересечения и в месте пересечения сходятся под прямым углом. Приподнятый блок вблизи места пересечения разломов разбит множеством трещин, как параллельных меридиональной ветви дислокаций, так и расположенных косо по отношению к ней. Максимальным сосредоточением разрывов характеризуется не только разломный узел, но и северное окончание меридиональной ветви, что свидетельствует о концентрации напряжений на концах Хулжингольского разрыва и является еще одним подтверждением его существования и развития как самостоятельной структуры. Если с активностью Хулжингольского разлома связано формирование надразломной внутригорной одноименной впадины, то Тулэтский разлом – это прежде всего результат новейшей активности Тулэтского поднятия. Его неотектоническая активизация отражена в наличии следов подвижек по разломам, параллельных Тулэтской ветви дислокаций, располагающихся как к юго-западу, так и к северо-востоку от нее. Эти разломы превышают протяженность Тулэтской ветви дислокаций и после пересечения меридиональной Хулжингольской ветви протягиваются на значительное расстояние в северо-западном направлении. Независимая активизация Тулэтского и Хулжингольского разломов в голоцене устанавливается также по следам палеоземлетрясений, вскрытых канавами и имеющих разный возраст по данным радиоуглеродного датирования.

*Исследование выполнено при поддержке РФФИ, грант № 20-05-00357 А.*

#### **Литература**

Нацаг-Юм Л., Балжинням И., Монхо Д. Сейсмическое районирование Улан-Батора. М.: Наука, 1971. С. 54–82.

Москвина А. Г. Механизм и параметры очага Могодского землетрясения 5 января 1967 г. и его афтершоков // Физика Земли. 1978. № 1. С. 3–17.

Huang J., Chen W. P. Source mechanisms of the Mogod earthquake sequence of 1967 and the event of 1974 July 4 in Mongolia // Geophys. J. R. astr. Soc. 1986. Vol. 84. P. 361–379.

## ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ ГЕЛИОСФЕРЫ

Г. Я. Смольков<sup>1</sup>, Ю. В. Баркин<sup>2</sup>, М. Ю. Баркин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга, г. Москва, Россия

smolkov@iszf.irk.ru

Непрерывная изменчивость окружающей природной среды обусловлена воздействиями на Землю солнечной активности, потоков галактических лучей и эндогенной активности Земли – гравитационного влияния на нее со стороны Луны, Солнца и остальных планет Солнечной системы при ее барицентрическом движении в гравитационном поле Галактики, а также внешними воздействиями на Солнечную систему в целом. При этом оболочки планет, спутников и Солнца совершают друг относительно друга малые поступательно-вращательные движения, деформационные и иные изменения. Возбуждение оболочек Земли внешними небесными телами приводит ее к энергетическому циклическому состоянию. Циклические смещения подвижного ядра оказывают циклические гравитационные воздействия на все оболочки Земли. Часть механической энергии при этом трансформируется в тепло, формируя дополнительное тепловое поле Земли. Все гидрометеорологические, геологические, геофизические и геодинамические процессы имеют циклический характер и происходят синхронно, проявляя полярную асимметрию. Геодинамическая модель вынужденных относительных смещений ядра получила впечатляющие приложения при изучении и объяснении ряда сложных геофизических проблем: в геодинамике – векового дрейфа полюса оси вращения и неприливного ускорения в осевом вращении Земли, в гравиметрии – наблюдаемых вековых изменений силы тяжести, в океанологии – векового изменения уровня океана как глобального, так и средних уровней океана в Северном и Южном полушариях, в геодезии – наблюдаемых явлений вековых укорачиваний длин широтных кругов в Северном и их удлинении в Южном полушариях (формы Земли). А также в решении проблем в сейсмологии и климатологии и широкого ряда других геофизических, геодинамических, геодезических явлений на Земле и других планетах и спутниках. Процесс гравитационной дифференциации земного вещества – мощнейший источник эндогенной энергии на нашей планете, одновременно может также питать собой и геомагнитное поле. Зарегистрированные фундаментальные скачкообразные явления свидетельствуют о вынужденных колебаниях ядра и деформации мантии Земли. Скачки центра масс ядра относительно центра масс мантии названы «галопированием ядра», выявляемого по однонаправ-

ленному скачку центра масс Земли, заранее предсказанному и затем обнаруженному по данным спутниковой геодезии. Не менее фундаментальным явлением оказался вековой дрейф центра массы Земли в область Северного полюса Земли, обуславливая полярную асимметрию специфики современной Арктики.

## **ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА И ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ НА ТЕКТОНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И СЕЙСМИЧНОСТЬ ЗЕМЛИ**

**Н. Т. Тарасов**

Институт физики Земли РАН, г. Москва, Россия  
tarasov@ifz.ru

Изучено влияние солнечной активности на глобальную сейсмичность Земли. Для анализа сейсмичности использовались каталоги глобальной сейсмичности NEIC и CMT, а различных параметров солнечной активности – данные наземных наблюдений, ИСЗ IMP-8, орбита которого располагалась за пределами магнитосферы Земли, и геостационарных ИСЗ серии GOES, а также каталоги геомагнитных бурь. Сначала рассмотрено изменение сейсмичности до и после магнитных бурь с внезапным началом (SSC). Для выделения вызванных изменений сейсмичности на фоне ее естественных вариаций и влияния других факторов использовалась методика наложения эпох [Тарасов, 2017, 2019]. Получена осредненная (за 1973–1981 гг) зависимость ежесуточного количества землетрясений с  $M_s > 4,4$  от времени в пределах временных окон  $\pm 30$  сут. от SSC.

Показано, что после SSC происходит статистически значимое уменьшение количества землетрясений на 1–2 %, а через 5–6 сут. оно начинает вновь возрастать. Однако отмеченное уменьшение началось как минимум за 2–3 сут. до SSC, и, следовательно, в этом временном интервале бури не могли быть его причиной. Такое изменение могло вызывать ионизирующее электромагнитное излучение Солнца (ЭИС), которое достигает Земли всего за 8,2 мин. Поэтому по той же методике было изучено изменение интенсивности ЭИС в радиочастотном диапазоне, которое часто используется как мера его ионизирующего излучения. Выяснилось, что примерно за трое суток до SSC наблюдаются всплески мощности ЭИС, что совпадает по времени с началом снижения сейсмической активности. Тогда было изучено изменение сейсмичности после резких всплесков ЭИС. Оказалось, что после них происходит резкое статистически высокозначимое сокращение количества землетрясений на 5–6 %, которое совпадает с ними по времени.

При этом суммарная энергия землетрясений (СЭЗ) на 32 % возрастает, несмотря на уменьшение их количества (т. е. возникают более сильные события). Однако такое повышение статистически незначимо, поскольку после ЭИС значения СЭЗ изменяются во времени сложным образом, что может быть связано с различным влиянием SSC и ЭИС на сейсмичность. В связи с этим воздействие SSC и ЭИС на сейсмичность было изучено по двум выборкам. В одну из них были включены только те SSC, до и после которых не наблюдалось резких всплесков интенсивности ЭИС, а в другую вошли всплески ЭИС, до и после которых не фиксировалось возникновение SSC. В первом случае после SSC наблюдалось возрастание СЭЗ на 52 % относительно уровня фона, а во втором, напротив, значения СЭЗ после ЭИС уменьшились на 73 %. Причем в обоих случаях наблюдаемые изменения были уже статистически значимы. Таким образом, оба эти фактора, связанные с солнечной активностью, вызывают уменьшение общего количества землетрясений. Однако воздействие магнитных бурь приводит к росту их энергии, а всплески мощности ЭИС – к ее уменьшению. При этом вероятность возникновения сильных землетрясений ( $M_s > 7$ ) после всплесков электромагнитного излучения Солнца почти вдвое уменьшается, а после геомагнитных бурь, напротив, более чем на треть возрастает. Причем наиболее сильно (на 55 %) их вероятность повышается после магнитных бурь, за несколько суток перед которыми фиксировались резкие всплески ЭИС.

#### **Литература**

Тарасов Н. Т. О влиянии солнечной активности на сейсмичность Земли // Триггерные эффекты в геосистемах : материалы IV Всерос. конф. с междунар. участием. М. : ГЕОС, 2017. С. 356–365.

Тарасов Н. Т. Влияние солнечной активности на сейсмичность Земли // Инженерная физика. 2019. № 6. С. 23–33.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МОДЕЛИРОВАНИИ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА**

**А. Ф. Филин**

Институт геологии и природопользования ДВО РАН

г. Благовещенск, Россия

[marsfilin@ascnet.ru](mailto:marsfilin@ascnet.ru)

По мере развития сейсмологии значительное внимание стало уделяться мониторингу сейсмической обстановки не только на сейсмоактивных территориях, но и в регионах со слабой и умеренной сейсмичностью.

При анализе большого количества событий как природного, так и техногенного характера возникает задача идентификации сейсмических

событий по типу источника [Формализованный анализ ... , 2017]. Решение данной задачи имеет первостепенное значение для осуществления качественного анализа приведенных в сейсмических каталогах событий.

Одним из возможных путей решения задачи идентификации событий выступает выявление общих закономерностей в массиве приведенных в каталоге данных.

Для достижения данной цели были использованы современные методы машинного обучения [Python и машинное ... , 2020]. В исследовании применялись три метода, задачей которых являлось разделение исходных данных на группы по совокупности признаков. Первым из них является Affinity propagation (метод распространения близости). При реализации данного метода объекты выборки обмениваются сигналами близости между ними, затем информация корректируется сообщениями, полученными от других источников.

Второй – метод Mean shift (сдвиг среднего значения). Алгоритм основан на итеративном вычислении центроидов, представляющих центр кластера среди признаков.

Третьим алгоритмом является OPTICS (упорядочение точек для обнаружения кластерной структуры), который в свою очередь является модификацией более старого DBSCAN. В данном случае кластеризация обеспечивается за счет вычисления плотности (многомерного расстояния) среди объектов внутри кластера.

Все три метода успешно показали свою применимость для решения поставленной задачи. Их отличительными особенностями являются работа на небольших (от 100 до 1000 событий) выборках и самостоятельное определение количества кластеров для классификации сейсмических событий.

#### **Литература**

Формализованный анализ коровой сейсмичности Сихотэ-Алинского орогена и прилегающих территорий / А. Н. Диденко, В. С. Захаров, Г. З. Гильманова, Т. В. Меркулова, М. В. Архипов // Тихоокеанская геология. 2017. Т. 36, № 2. С. 58–69

Python и машинное обучение. Машинное и глубокое обучение с использованием Python, scikit-learn. СПб. : Диалектика, 2020. 848 с.

## ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ БЫСТРИНСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 21 СЕНТЯБРЯ 2020 Г. ( $M_w = 5,6$ ) ПО ТЕЛЕСЕЙСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

**А. И. Филиппова**<sup>1,2</sup>, **Б. Г. Букчин**<sup>1</sup>, **А. С. Фомочкина**<sup>1,3</sup>,  
**В. И. Мельникова**<sup>2</sup>, **Я. Б. Радзиминович**<sup>2</sup>, **Н. А. Гилева**<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт теории прогноза землетрясений

и математической геофизики РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Российский государственный университет нефти и газа  
им. И. М. Губкина, г. Москва, Россия

<sup>4</sup> Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Иркутск, Россия  
ale@crust.irk.ru

21 сентября 2020 г. на юго-западном фланге Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) в восточной части Тункинской системы впадин произошло достаточно сильное землетрясение ( $M_w = 5,6$ ), названное по своему местоположению Быстринским. Эпицентр этого сейсмического события локализован в области, где за весь период инструментальных наблюдений регистрировались лишь немногочисленные слабые толчки. Предварительный анализ землетрясения 21 сентября 2020 г. проведен в работе [Быстринское землетрясение ... , 2020], однако многие аспекты, связанные в первую очередь с его очаговыми параметрами, требуют дальнейших детальных исследований.

Настоящая работа посвящена определению очаговых параметров Быстринского землетрясения по данным поверхностных волн. Для этого по записям 21 сейсмической станции ( $\Delta > 20^\circ$ ) методом спектрально-временного анализа были рассчитаны амплитудные спектры волн Рэля и Лява в диапазоне периодов 45–60 с. Вначале землетрясение рассматривалось в приближении точечного источника, и по полученным спектрам поверхностных волн определялись его глубина, сейсмический момент и механизм очага [Букчин, 1989]. Затем очаг был рассмотрен в приближении плоского источника и были определены его интегральные параметры, характеризующие геометрию разрыва и его развитие во времени [Characterizing the foreshock ... , 2020]. Также для этого события была построена билатеральная модель очага [Там же].

В результате было получено, что Быстринское землетрясение имело магнитуду  $M_w = 5,6$ , глубину центроида – 24 км, а его фокальный механизм представлял собой левосторонний взбросо-сдвиг по субширотной («рабочей») плоскости, вероятно, связанной с зоной Главного Саянского разлома. Реальная длительность времени действия источника составила 15 с, а длины его большой и малой осей – 45 и 0–10 км соответственно. Процесс разрывообразования распространялся практически в одном



направлении (на северо-запад) со скоростью 2,4 км/с, что примерно соответствует 0,7 от скорости *S*-волн, установленной для рассматриваемой части коры юго-западного фланга БРЗ различными методами.

#### Литература

Быстринское землетрясение 21.09.2020 г. ( $M_w = 5,5$ ) в Южном Прибайкалье: предварительные результаты инструментальных и макросейсмических наблюдений / Н. А. Гилева, Е. А. Кобелева, Я. Б. Радзиминович, В. И. Мельникова, В. В. Чечельницкий // Вспомогательная сейсмология. 2020. Т. 47, № 4. С. 55–71. <https://doi.org/10.21455/VIS2020.2-4>

Букчин Б. Г. Об определении параметров очага землетрясения по записям поверхностных волн в случае неточного задания характеристик среды // Известия АН СССР. Серия: Физика Земли. 1989. № 9. С. 34–41.

Characterizing the foreshock, main shock, and aftershock sequences of the recent major earthquakes in Southern Alaska, 2016–2018 / B. G. Bukchin, A. S. Fomochkina, V. G. Kossobokov, A. K. Nekrasova // Front. Earth Sci. 2020. Vol. 8. 584659. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.584659>

## КУЛТУКСКОЕ СОЧЛЕНЕНИЕ АКТИВНЫХ РАЗЛОМОВ ЮЖНО-БАЙКАЛЬСКОЙ ВПАДИНЫ И ГЛАВНОГО САЯНСКОГО РАЗЛОМА: ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ПОЛИГОН ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПОДГОТОВКИ СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Е. П. Чебыкин<sup>1,2</sup>, А. М. Ильясова<sup>1</sup>, С. В. Рассказов<sup>1,3</sup>,  
И. С. Чувашова<sup>1,3</sup>, С. А. Борняков<sup>1</sup>, С. В. Снопков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия  
[ercheb@yandex.ru](mailto:ercheb@yandex.ru)

На Култукском сейсмопрогностическом полигоне проводится гидрогеохимический мониторинг, в основу которого положен эффект возрастания отношения активностей урана-234 и урана-238 (ОА4/8) в подземных водах в результате сейсмогенных деформаций коры. Полигон находится в гидрогеохимической зоне милонитов Главного Саянского разлома, в его сочленении с Обручевским и Юго-Западным Бортовым разломами, ограничивающими западную часть Южно-Байкальской впадины соответственно с севера и юга. Вместе с изотопами *U* в подземных водах определяются гидрогеохимические компоненты, вариации которых не находят простого объяснения в связи с происходящими сейсмогенными деформациями. При отборе проб измеряются такие параметры воды, как *Eh*, рН, электропроводность, температура. Из-за неоднозначности причин откликов компонентов на сейсмогенные деформации они не могут использоваться как прямые сейсмопрогностические признаки, но играют вспомогательную роль при определении частоты опробования станций для изотопного анализа *U*. Кроме того, в точке наблюдения фиксируется давление атмосферы.

За период наблюдений 2012–2021 гг. получены гидрогеохимические отклики на 2-летнюю подготовку (со 2 ноября 2013 г. до 5 сентября 2015 г.) Голоуштенского землетрясения ( $K = 12,4$ ) и 5-летнюю подготовку (со 2 декабря 2015 г. до 9 декабря 2020 г.) Селенгинского ( $K = 13,9$ ). Голоуштенскому землетрясению предшествовали гидроизотопные отклики сжатия микротрещин полигона, предотвращавшего поступление  $^{234}\text{U}$  из минеральных радиогенных дефектов. При подготовке Селенгинского землетрясения проявились отклики растяжения обводненных тектонических микротрещин полигона, вскрывавших минеральные радиогенные дефекты. После этого землетрясения их эффективность резко возросла в виде пульсаций. Полученные данные регистрации синкинематического закрытия и открытия трещин на полигоне создают уран-гидроизотопную основу для разработки строгих прогностических критериев определения стадий подготовки будущих сильных землетрясений в Южно-Байкальской впадине.

*Финансирование по крупному проекту 13.1902.21.0033.*

## **СВЯЗЬ СЕЙСМИЧЕСКИХ МОМЕНТОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С РЕГИОНАЛЬНЫМ ГЕОДИНАМИЧЕСКИМ РЕЖИМОМ**

**В. В. Чепцов<sup>1</sup>, А. А. Добрынина<sup>1,2</sup>,  
В. А. Саньков<sup>1</sup>, В. В. Чечельницкий<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

<sup>3</sup> Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Иркутск, Россия

wersusche@gmail.com

В работе проведено сопоставление сейсмических моментов землетрясений, локализованных в зонах с различным геодинамическим режимом: зонах растяжения, сжатия, трансформных разломах и зоне реликтовой субдукции (зона Вранча). Для сравнения использовались опубликованные значения сейсмических моментов. Для Байкальской рифтовой системы (БРС) соотношение между логарифмом сейсмического момента и локальной магнитудой  $M_L$  имеет вид:  $\lg(M_0) \pm 0,25 = (1,23 \pm 0,07) \cdot M_L + (10,14 \pm 0,03)$  [Source parameters ...]. Регрессионная зависимость для БРС сопоставлялась с данными для других зон растяжения литосферы – для рифтов Северного моря, Греции и Провинции Бассейнов и Хребтов [Там же]. Соотношения  $M_0$ – $M_L$  показывают хорошее согласие в величинах сейсмического момента для разных зон растяжения литосферы. Полученное для зон растяжения соотношение  $M_0$ – $M_L$  согласуется с зависимостью между  $M_0$  и  $M_L$  для БРС и

описывается логлинейной зависимостью [Там же]:  $\lg(M_0) \pm 0,50 = (1,58 \pm 0,07) \cdot M_L + (8,98 \pm 0,06)$ . Зависимость хорошо описывает весь объем наблюдаемых данных, а вариации  $\lg(M_0) \pm 0,50$  включают около 88 % всех значений. Для сравнения соотношений  $M_0 - M_L$  использовались данные о сейсмических моментах, полученных для различных геодинамических регионов: зоны сжатия (Канада, Италия) –  $\lg(M_0) = (1,29 \pm 0,04) \cdot M_L + (9,70 \pm 0,07)$ ; зоны сдвига – крупных трансформных разломов (разлом Сан-Андреас (Калифорния, США), Альпийский разлом (Новая Зеландия), Северо-Анатолийский разлом (Турция)) –  $(1,34 \pm 0,04) \cdot M_L + (9,48 \pm 0,04)$ ; трансформного разлома, осложненного системой типа pull-аpart (система «Мервое море – Иорданский трансформный разлом», Израиль), –  $(1,25 \pm 0,08) \cdot M_L + (10,29 \pm 0,06)$ , и зоны реликтовой субдукции –  $1,00 \cdot M_L + 10,39$ . Уравнения, описывающие зависимость сейсмического момента от локальной магнитуды для разных зон, получены по данным, опубликованным в работах [Source parameters ...], уравнение регрессии для зоны Вранча из работ, указанных в [Там же]. Сопоставление зависимостей  $M_0 - M_L$  для разных регионов показывает, что наблюдается тенденция к увеличению угла наклона графика при переходе от зоны Вранча к зонам растяжения. В целом видно различие регрессионных прямых, относящихся к зонам с разными тектоническими режимами. Это позволяет говорить о том, что очаговые параметры землетрясений в рифтовых системах характеризуются определенной общностью, отражающей общие закономерности деформации литосферы и сейсмичности в зонах растяжения литосферы.

*Работы проводились в рамках проекта № 075-15-2020-787 «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории».*

#### **Литература**

Source parameters of earthquakes in the Baikal rift system / A. A. Dobrynina, V. V. Cheptsov, V. A. Sankov, V. V. Chechelnitky, R. Biswas // Seismic Waves as a versatile tool: Theory and Practices, CRC Press Taylor & Francis.

# ИЗМЕРЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ И ВЗРЫВАХ СЕЙСМИЧЕСКИМИ СТАНЦИЯМИ

**В. В. Чечельницкий**

Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Иркутск, Россия  
chechel@crust.irk.ru

Известно, что величина относительной деформации в массиве определяется отношением максимальной скорости смещения грунта к скорости распространения фронта волны. Это, строго говоря, верно для однородной идеально упругой среды, хотя многие авторы применяют ее для оценок относительных деформаций в массиве при взрывах [Богацкий, Пергамент, 1978]. Проведение синхронной трехкомпонентной регистрации в двух пунктах наблюдений сейсмическими каналами, которые имеют одинаковые фазовые характеристики, дают возможность построить изменения абсолютных и относительных деформаций между этими пунктами по компонентам и вектора деформаций во времени при взрывах и землетрясениях:

$$\begin{aligned} dx(t) &= X_1(t) - X_2(t) & \varepsilon_x &= dx(t) / L \\ dy(t) &= Y_1(t) - Y_2(t) & \varepsilon_y &= dy(t) / L \\ dz(t) &= Z_1(t) - Z_2(t) & \varepsilon_z &= dz(t) / L \\ dA(t) &= \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2} & \varepsilon &= dA(t) / L \end{aligned}$$

Здесь  $dx(t)$ ,  $dy(t)$ ,  $dz(t)$ ,  $dA(t)$  – абсолютные значения деформаций по компонентам  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и полному вектору между п. 1 и 2;  $X_1(t)$ ,  $X_2(t)$ ,  $A_1(t)$ ,  $A_2(t)$  – значения смещений по компонентам и полному вектору в п. 1 и 2 во времени;  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_z$ ,  $\varepsilon$  – относительные значения деформаций по компонентам  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и полному вектору между п. 1 и 2;  $L$  – расстояние между п. 1 и 2.

Надо четко понимать, что есть частотный и амплитудный пределы измерений. Пределы измерений связаны с амплитудно-частотными и фазовыми характеристиками применяемых приборов. Например, для сейсмометров Trillium Compact TC20-SV1 уровень ограничения по скорости колебаний 26 мм/с от 0,1 до 10 Гц. Это значит, что на частоте 1 Гц максимальная амплитуда смещений, которую можно зарегистрировать, составит 4,14 мм, а на частоте 0,1 Гц – 41,4 мм, на 10 Гц – 0,414 мм.

Ограничение нижнего предела связано как с собственными шумами сейсмометра, так и с микросейсмическими шумами в пункте наблюдений. На практике в основном именно микроколебания ограничивают минимальную амплитуду измерений колебаний при взрывах и землетрясениях. В то же время абсолютная деформация является разностью двух независимых измеряемых величин, и, как известно из теории ошибок

[Зайдель, 1974], ее относительная погрешность будет тем больше, чем меньше  $|X_1 - X_2|$ , и относительная погрешность возрастает до бесконечности, если  $X_1 \rightarrow X_2$ . Поэтому невозможно добиться хорошей точности определения абсолютной деформации, когда она находится как небольшая разность смещений в двух пунктах наблюдений, существенно превышающих искомую.

Данная методика была применена для оценок деформаций скального массива при массовых взрывах в карьере трубки Удачная, 9-этажного жилого дома в Иркутске, бетонной плотины Иркутской ГЭС при землетрясениях.

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках госзадания № 075-01304-20-01/11.*

#### **Литература**

Богацкий В. Ф., Пергамент В. Х. Сейсмическая безопасность при взрывных работах. М.: Недра, 1978. 126 с.

Зайдель А. Н. Ошибки измерений физических величин. Л.: Наука, Ленингр. Отд-ние, 1974. 108 с.

## **СЕЙСМИТЫ В РЫХЛЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ЗИМНЕГО БЕРЕГА БЕЛОГО МОРЯ (АРХАНГЕЛЬСКАЯ ОБЛАСТЬ)**

**С. В. Шварев**<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт географии РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия  
shvarev@ifz.ru

Восточная часть Прибеломорья – окраина Русской плиты, традиционно оцениваемая как тектонически стабильная территория. Однако ощутимые землетрясения ( $M \approx 3,5-4$ ) фиксировались здесь инструментально, а в акватории Белого моря произошло сильнейшее для платформы землетрясение ( $M \approx 6,5$ , 1627 г.). К западу, на Фенноскандинавском щите, изучено значительное количество следов палеоземлетрясений, относимых к позднему ледниковью. Новые данные раздвигают временные рамки до среднего голоцена [Николаева, Лаврова, Денисов, 2017] и межледниковья [Palaeoseismic traces ... , 2019]. Известны палеосейсмодислокации на западном побережье Горла Белого моря (Терском берегу), что дает возможность ожидать такие структуры и к востоку. На восточном побережье (Зимнем берегу) обнаружены нарушения на четырех участках. В трех случаях нарушенными оказались позднеплейстоценовые бассейновые отложения, вскрытые в абразионных уступах под мореной последнего оледенения: (1) 18–20 м (разрез Конецгорья);

(2)  $\approx 30$  м (Татариха) и (3)  $\approx 30$  м (Ручьи), и в одном случае (4) – в голоценовой террасе высотой  $\approx 6$ –7 м. В 1-м разрезе обнаружены надвиговзбросы ССЗ простираения с падением к ВСВ ( $A_{зд} 55$ – $70^\circ \perp 65$ – $80^\circ$ ) с амплитудой до 20 см, затрагивающие подошву морены. Разрывы отвечают фланговой морфоструктуре Беломорско-Кулойского плато (БКП). Во 2-м разрезе серия пологих ( $35$ – $50^\circ$ ) веерообразно расходящихся надвигов деформирует подошву морены со смещением 15–30 см и внедрением песков по плоскостям разрывов. Вниз по разрезу разрывы сливаются в единую зону взбросо-надвига  $A_{зд} 55$ – $65^\circ \perp 70$ – $80^\circ$  с амплитудой до 1 м, а к поверхности выполаживаются, образуя структуру типа «конский хвост». Кинематика разрыва отвечает флангу БКП. В 3-м разрезе, как и в первых двух случаях, разрывы в толще бассейновых песков смещают и морену последнего оледенения (сбросы с поднятым восточным крылом (до 0,6 м), сопрягающиеся с взбросами и пологими надвигами). Кроме того, в разрезе насчитывается до 17 деформационных горизонтов мощностью от 5–10 до 60 см со структурами разжижения. В 4-м разрезе бассейновые постледниковые осадки наклонены к северу под углом  $10$ – $15^\circ$  и нарушены серией надвигов с реверсивными сбросами с падением к ЮЗ ( $A_{зд} 200$ – $220^\circ \perp 25$ – $70^\circ$ ;  $A=0,1$ – $1,0$  м). Выводы: 1) на восточном берегу Горла Белого моря имеются свидетельства новейшей тектонической активности в меж- и послеледниковое время; 2) разрывы в рыхлых отложениях отражают активность фланговых разломов БКП; 3) горизонты разжижения в межледниковых осадках свидетельствуют о максимуме сейсмичности в начале седиментационного цикла со снижением интенсивности и повторяемости к середине цикла и прекращением в конце, перед последним оледенением; 4) разрывные нарушения имеют более поздний постледниковый и голоценовый возраст.

### Литература

Николаева С. Б., Лаврова Н. Б., Денисов Д. Б. Катастрофическое событие голоцена в донных отложениях озер Кольского региона (Северо-Восток Фенноскандинавского щита) // Доклады Академии наук. 2017. Т. 473, № 1. С. 88–92.

Palaeoseismic traces in the Late Pleistocene deposits of Southern Kola Peninsula / N. Zaretskaya, S. Shvarev, O. Korsakova, V. Grigoriev // Börner, A., Hüneke, H., Lorenz, S., (Eds.), Field Symposium of the INQUA PeriBaltic Working Group “From Weichselian Ice-Sheet Dynamics to Holocene Land Use Development in Western Pomerania and Mecklenburg”. Abstract Volume. Scientific Technical Report STR 19/01, Potsdam: GFZ German Research Centre for Geosciences. 2019. P. 131–133.

# ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ СЕЙСМОГЕННЫХ НАРУШЕНИЙ В ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ТЕРСКОГО БЕРЕГА БЕЛОГО МОРЯ (КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ)

С. В. Шварев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт географии РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия  
shvarev@ifz.ru

На Кольском полуострове известны многочисленные сейсмогенные деформации в скальных породах и рыхлых отложениях. Данные об их возрасте варьируют в пределах голоцена – позднего ледникового. На Терском берегу Белого моря расположено несколько разрезов в долинах рек Чапома (1), Каменка (2) и Чаваньга (3) с бассейновыми отложениями, датировемыми периодом 138–23 тыс. л. н. (1), 59–52 тыс. л. н. (2), 99–18 тыс. л. н. (3) [Korsakova, 2009; Позднелепесточные разрезы ... , 2019]. В этих разрезах обнаружены деформации, имеющие систематические признаки, позволяющие: а) генетически связать их с сильными землетрясениями; б) пространственно соотнести с разрывными структурами в кристаллическом фундаменте; в) впервые для Кольского полуострова установить доледниковый возраст землетрясений.

Участки расположены в структурно-тектонической обстановке, обусловленной сопряжением структур Кандалакшского залива и Горла Белого моря, и их позиция связана с простираем и кинематикой обрамляющих их разломов: участок 1 (Чапома) обусловлен СВ разломами; участок 3 (Чаваньга) расположен на фланге Кандалакшского грабена, и здесь преобладают СЗ разломы; участок 2 (Каменка) находится в зоне сочленения структур Горла и Кандалакшского залива, и его тектонический режим связан с суперпозицией разломов СЗ и СВ простираем.

В разрезе Чапома (1) наблюдается несколько типов деформаций, затрагивающих подморенную толщу: 1) морские глины и песчано-гравийные отложения смяты складками (до 3 м амплитудой); 2) эта же толща разбита серией вторичных сбросов с амплитудой до нескольких десятков сантиметров, а также горизонтальных срезов. В разрезе Каменка (2): 1) морские глины сдавлены в узкие параллельные сжатые складки-пластины, ориентированные субмеридионально и внедренные снизу в вышележащие пески с амплитудой в несколько сантиметров (до первых десятков сантиметров); 2) пески над глинами разбиты сбросами. В разрезе Чаваньга (3): 1) нижняя часть толщи – параллельно-слоистые (первично-горизонтальные) пески, супеси и суглинки с прослоями гравия и подстилаемые гравийно-галечным горизонтом смяты в складки с амплитудой в первые метры; 2) толща разбита серией сбросов и взбросов с

амплитудой до нескольких десятков сантиметров; 3) верхняя часть толщи нарушена кластическими дайками, многочисленными малоамплитудными сбросами с падением к СВ и СЗ и «плавающими» валунами в участках разжижения песков.

Во всех разрезах наблюдаются тектонические и сейсмогенные признаки деформаций, такие как: 1) пространственное соответствие ориентировки складок и разрывов структурам фундамента; 2) последовательность развития деформаций от сжатия к растяжению; 3) в отдельных разрезах наблюдаются следы разжижения (3) и вертикального внедрения нижележащих отложений в перекрывающие (2).

#### **Литература**

Korsakova O. P. Pleistocene marine deposits in the coastal areas in the coastal areas of Kola Peninsula // *Quaternary International*. 2015. Vol. 383. P. 4–35

Поздненеоплейстоценовые разрезы Терского берега Белого моря: строение и новые геохронометрические данные / Н. Е. Зарецкая, О. П. Корсакова, А. Н. Молодков, В. А. Григорьев // *Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России*. 2019. Вып. 6. С. 40–46.

## **КВАЗИЦИКЛИЧЕСКАЯ ПЕРИОДИЧНОСТЬ СЕЙСМИЧНОСТИ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БОЛЬШОГО КАВКАЗА ЗА ПОСЛЕДНИЕ 200 ЛЕТ И СРЕДНЕСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ РЕГИОНА**

**Ф. Л. Яковлев<sup>1</sup>, И. П. Габсатарова<sup>2</sup>, Р. Ю. Стаховская<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия

yak@ifz.ru

Около тридцати лет назад для региона Дагестана и Чечни на качественном уровне было выявлено существование закономерного квазициклического режима сейсмичности на площади около 300×300 км [Захарова, Старовойт, Яковлева, 1989] для периода 1800–1985 гг. Закономерность состояла в снижении уровня сейсмичности в течение одного цикла длительностью 10–30 лет от пикового события (магнитуда 5,0–6,5) до фоновых значений с быстрым (1–3 года) ростом сейсмичности до следующего пикового события.

Это гипотетическое явление было более строго проанализировано с расширением каталога до 2017 г. [Яковлев, Стаховская, Габсатарова, 2020; Габсатарова, Борисов, 2017]. Для анализа тех же 8 «полигонов» (размером от 4,5×4,5 до 3,0×1,0 градусов) в каталоге для каждого года отбирались максимальные события и строились графики «магнитуда – время». Для выделения циклов на графиках использовался «трафарет» с



наклонным «коридором» (с  $M=6$  до  $M=4$  за 25 лет, шириной в  $\pm 0,25 M$ ), построенный по предыдущим результатам. По гипотетической закономерности «разрешались» события только внутри и ниже «коридора», это давало возможность ее проверки. «Трафарет» по возможности совмещался с графиком по очередному пиковому событию так, чтобы выше «коридора» от пикового события до фонового уровня  $M=4$  не было никаких событий. В этом случае квазицикл считался корректным; в некорректных наблюдались события – «отскоки» выше «коридора». Для всех полигонов суммировались длительности корректных циклов, что позволяло подтвердить наличие закономерности и выявить оптимальный размер полигона, для которого такая закономерность справедлива. Лучшим признан полигон с размерами примерно  $300 \times 300$  км и центром около г. Грозного. Для него было выделено пять корректных циклов общей длительностью 83 года и три некорректных. Последний незавершенный, девятый, цикл начался здесь в 2008 г. (пиковое  $M=5,8$ ). Оказалось, что произошедшие в нем уже после публикации [Яковлев, Стаховская, Габсатарова, 2020] события 2020 и 2021 гг. ( $M=4,9-4,6$ ) укладываются в выделенный «коридор». В рамках среднесрочного прогноза в дальнейшем можно ожидать снижения уровня текущих событий до  $M=4$  около 2030 г. и роста до максимального (случайной магнитуды, до  $5,0-6,8$ ) около 2033 г.

Полученные на новых данных результаты подтвердили существование закономерного изменения уровня сейсмичности в восточной зоне Северного Кавказа как природного явления. Данная закономерность может быть применена для среднесрочного прогноза и тестирования моделей сейсмичности в этом регионе.

### Литература

Захарова А. И., Старовойт О. Е., Яковлев Ф. Л. Блоковая сейсмичность Северного Кавказа // Дискретные свойства геофизической среды. М. : Наука, 1989. С. 137–148.

Яковлев Ф. Л., Стаховская Р. Ю., Габсатарова И. П. О периодичности проявления сейсмичности Дагестана и окрестностей в XIX–XXI веках // Структура, вещественный состав, свойства, современная геодинамика и сейсмичность платформенных территорий и сопредельных регионов. Воронеж : Изд-во ВГУ, 2020. С. 405–410.

Габсатарова И. П., Борисов П. А. Современный сводный каталог землетрясений Кавказа: проблемы создания и пути совершенствования // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных : материалы XII Междунар. сейсмол. школы. ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С. 105–109.

Научное издание

**РАЗЛОМООБРАЗОВАНИЕ В ЛИТОСФЕРЕ  
И СОПУТСТВУЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ:  
ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ**

ISBN 978-5-9624-1919-0

Редактор *В. В. Попова*

На обложке использован рисунок  
из статьи С. И. Шермана

---

Подписано в печать 22.04.2021. Формат 60×90 1/16  
Усл. печ. л. 14,6. Тираж 100 экз. Заказ 130

---

ИЗДАТЕЛЬСТВО ИГУ  
664082, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 124