

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи

АГЕЕВ Алексей Сергеевич



**ОСОБЕННОСТИ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ БАЙКАЛО-СТАНОВОЙ
РЕГИОНАЛЬНОЙ СДВИГОВОЙ ЗОНЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ
КОМПЛЕКСНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ
ДАННЫХ**

Специальность 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных
ископаемых

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель- доктор
геолого-минералогических наук
Егоров Алексей Сергеевич

Санкт-Петербург – 2018

Оглавление

Введение	4
Глава 1 Особенности глубинного строения и проявления в геофизических полях, крупнейших сдвиговых зон Мира	9
1.1 Тектоническая зона Сан Андреас	9
1.1.1 Структура земной коры региональной сдвиговой зоны Сан Андреас по данным комплексных геолого-геофизических исследований	9
1.1.2 Особенности глубинного строения земной коры РСЗ Сан Андреас	20
1.1.3 Морфология тектонических нарушений в земной коре РСЗ Сан Андреас	25
Выводы	26
1.2 Тектоническая зона Верхнерейнского грабена	28
1.2.1 Структура земной коры тектонической зоны Верхнерейнского грабена по данным комплексных геолого-геофизических исследований	28
1.2.2 Особенности глубинного строения земной коры Верхнерейнского грабена	33
Выводы	37
1.3 Байкало-Становая региональная сдвиговая зона	38
1.3.1. Структура земной коры по результатам комплексной интерпретации геофизических данных в сечении геотраверса «1-СБ»	38
1.3.2. Результаты комплексной интерпретации геолого-геофизических данных в полосовой зоне геотраверса «1-СБ»	45
Выводы	47
Глава 2. Методическая схема комплексной интерпретации геолого-геофизических данных .	48
2.1 Структура методической схемы	48
2.2 Формирование банка геолого-геофизических данных	50
2.3 Моделирование латерального распределения структурно-вещественных неоднородностей земной коры	52
2.4. Моделирование вертикального распределения структурно-вещественных неоднородностей земной коры БСЗ	60
Глава 3 Особенности глубинного строения земной коры Байкало-Становой и Монголо- Охотской сдвиговых зон в сечении геотраверса 3-ДВ	65
3.1 Фактологическая основа исследований	65
3.2 Моделирование латерального распределения структурно-вещественных неоднородностей Байкало-Становой и Монголо-Охотской сдвиговых зон	73

3.3 Связь результатов исследования глубинного строения Байкало-Становой региональной сдвиговой зоны с распределением источников минеральных вод региона	76
3.4 Моделирование структурно-вещественных неоднородностей земной коры в вертикальном измерении.....	79
3.5 Моделирование структурно-вещественных неоднородностей земной коры Монголо- Охотской зоны вертикальном измерении.....	84
Выводы.....	86
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	88
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	89

Введение

Актуальность темы исследования

Необходимость изучения глубинного строения Байкало-Становой региональной сдвиговой зоны, в первую очередь, связано с повышенным уровнем сейсмичности, наблюдаемом в ее пределах. Высокая концентрация очагов землетрясений влияет на требования к технике безопасности при промышленном и гражданском строительстве. Использование в процессе строительства материалов и конструкций, устойчивых к землетрясениям, увеличивает также и стоимость возведения того или иного объекта. Наряду с этим, интенсивная деструкция земной коры создает значительные проблемы при решении задач геологического картирования и прогнозно-минерагенических исследований.

Цели работы

Изучение структуры земной коры Байкало-Становой региональной сдвиговой зоны (БСЗ) на основе предметного анализа результатов комплексных исследований крупнейших сдвиговых зон мира и развитие методики, включающей не только традиционный комплекс геологической интерпретации геофизических и дистанционных данных, но и учет результатов реологического моделирования и сейсмологического анализа.

Задачи исследования

- Провести предметный анализ опыта комплексных геолого-геофизических исследований глубинного строения крупнейших региональных сдвиговых зон Мира.
- Разработать методику комплексного исследования глубинного строения Байкало-Становой региональной сдвиговой зоны, позволяющую проводить качественную оценку интенсивности деструкции земной коры в латеральном и вертикальном направлениях.
- Оценить параметры и форму современных тектонических нарушений Байкало-Становой сдвиговой зоны и субпараллельной Монголо-Охотской шовной зоны.

Степень разработанности направления

Изучению глубинного строения земной коры БСЗ региона посвящено небольшое, в сравнении с мировыми аналогами, количество работ, Среди них выделяются научные труды К.Г. Леви, Д.В. Рундквиста, которые рассматривают БСЗ как границу литосферных плит на начальном этапе формирования.

Представление о кинематике и форме тектонических нарушений, развивающихся между Сибирским и Забайкальским блоками литосферы в различные годы, были изложены в работах Шермана С. И., Козьмина Б.М., Имаева В.С, Санькова В.А. и др.

Новый импульс в исследованиях земной коры этого региона придали комплексные геолого-геофизические работы вдоль геотраверсов «1-СБ» и «3-ДВ», выполненные в начале XXI века коллективом исполнителей ФГБУ «ВСЕГЕИ», АО «СНИИГиМС» и рядом других организаций.

Научная новизна

Разработана методика комплексного изучения глубинного строения региональной сдвиговой зоны, включающая не только традиционные методы трехмерного геолого-геофизического моделирования, но также и учет данных реологических и сейсмологических исследований. Трассировано пространственное положение главного шва зоны и ее оперения на дневной поверхности. Обосновано отличие тектонической дислацированности верхней коры, подстилаемой субгоризонтальной зоной хрупко-пластичного перехода (ХПП) от средней-нижней коры. Установлено, что листрические тектонические дислокации зоны, откартированные на дневной поверхности, имеют замыкаются в пределах выделенного слоя ХПП.

Теоретическая и практическая значимость

Полученные в ходе исследований результаты, позволяют расширить понимание физических и тектонических процессов, происходящих в земной коре в условиях активных сдвиговых деформаций.

Результаты исследования имеют практическое значение в решении задач геологического и гидрогеологического картирования и способствуют развитию знаний в области прогноза сейсмогеологических опасностей.

Фактический материал и методы исследования

В основу работы положен обширный фактический материал в виде разнотипных геологических, геофизических карт, неотектонических и тектонических схем, сейсмологический данных, полностью покрывающих область развития Байкало-Становой сдвиговой зоны. Наряду с этим принципиально важная информация о глубинном строении этой геоструктуры была получена в результате расчета обратных задач теории потенциала и в ходе анализа данных сейсморазведочных исследований методами отраженных волн и глубинного сейсмического зондирования. Исходные данные были собраны и систематизированы автором за время работы в центре глубинной геофизики ФГБУ «ВСЕГЕИ».

Основными методами изучения распределения активных разломов на дневной поверхности являются операции визуального (по характерным особенностям поля) и автоматизированного линеamentного анализа карт потенциальных геофизических полей, их трансформант и космоснимков. Верификация полученных линеamentных схем проходит два

этапа: монометодный и комплексный. В рамках последнего, наряду с операциями сопоставления итоговой схемы линеаментов с данными тектонического и неотектонического картирования, проводится анализ полученной схемы на непротиворечивость данным геологической основы. Вспомогательными источниками информации в ходе работы являются данные сейсмологических, геотермических исследований,

Трассирование структурно-вещественных неоднородностей в сечениях геотраверсов основывается на строгой пространственной привязке последних на дневной поверхности. В ходе дальнейших исследований проводится сопоставление взаимного пространственного расположения рефлекторов (по разрезу МОВ-ОГТ), гипоцентров землетрясений, зон наибольших градиентов глубинных моделей потенциальных геофизических полей и данных магнитотеллурических исследований. Принципиальную роль в ходе работы играет учет данных реологического моделирования

Личный вклад автора заключается в:

- предметном анализе результатов комплексных исследований глубинного строения крупнейших сдвиговых зон мира и проведения аналогичных работ для Байкало-Становой сдвиговой зоны;
- построении схемы пространственного распределения современных тектонических нарушений Байкало-Становой сдвиговой зоны;
- изучении формы тектонических нарушений БСЗ в сечениях опорных геофизических профилей;
- установлении глубины и мощности слоя хрупко-пластичного перехода в пределах БСЗ.

Защищаемые положения

1) Байкало-Становая сдвиговая зона имеет аналогичные черты с эталонными зонами Сан Андреас и Верхнерейнского грабена по следующим позициям: имеет место высокосейсмичная реологически хрупкая верхняя кора мощностью 12-15 км, в которой фиксируется подавляющее количество листрических разрывных нарушений. Выделена субгоризонтальная зона хрупко-пластичного перехода мощностью 3-5 км, в пределах которой выполаживаются листрические разломы.

2) Впервые в традиционный комплекс геологической интерпретации геофизических данных включены результаты реологического моделирования, которые позволили в Байкало-Становой сдвиговой зоне установить тектоно-динамическую морфологию слоев с хрупкими и упруго-вязкими характеристиками.

3) В Байкало-Становой сдвиговой зоне откартированы фрагменты магистральных и оперяющих разломов. Установлено сочленение по оперяющим дислокациям этой зоны со смежной сдвиговой шовной Монголо-Охотской зоной более древнего возраста заложения, в которой наблюдается похожая реологическая расслоенность верхней части земной коры.

Соответствие диссертации паспорту специальности

Тема и содержание диссертации соответствуют научной специальности по следующим пунктам областей исследований:

- п. 14. «Методы обработки и интерпретации результатов измерения геофизических полей»,
- п. 22. «Теоретическое и экспериментальное исследование связей петрофизических и физических свойств горных пород с результатами измерения геофизических полей».
- п. 25 «Применение геофизических методов при решении задач охраны окружающей среды»

Достоверность и обоснованность научных положений подтверждается представительностью и надежностью исходных материалов; применением современных методов обработки и интерпретации данных; непротиворечивостью выводов автора и предшественников

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы обсуждены на заседаниях кафедры геофизических и геохимических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета, кафедры геологии месторождений полезных ископаемых Российского государственного геолого-разведочного университета им. Серго Орджоникидзе (МГРИ-РГГУ) в 2015-2018 гг. Результаты исследования доложены и получили нейтральную, либо положительную оценку на следующих конференциях: X Международная научно-практическая конференция «Геофизика-2015» (2015), «67th Berg- und Huttenmannischer Tag 2016» (2016), «V Международная конференция молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского» (2017), «L (50-е) Юбилейное Тектоническое совещание "Проблемы тектоники и геодинамики земной коры и мантии"» (2018).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 7 работ [Агеев, 2016, Ageev, 2016, Агеев и др., 2017, Агеев и Егоров, 2018, Агеев и Егоров, 2017 а], Агеев и Егоров, 2017б), Агеев и Егоров, 2018], 3 статьи представляют основные результаты диссертационного исследования в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России (ссылки подчеркнуты).

Структура и объем работы: диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературных источников; содержит 97 страниц, включая 42 рисунок, 1 таблицу. Список использованных литературных источников содержит 83 наименование.

Благодарности. Диссертационное исследование выполнено под руководством доктора геолого-минералогических наук, заведующего кафедрой геофизических и геохимических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых А.С. Егорова, которому автор выражает глубокую признательность за всестороннюю поддержку в научной работе и постоянную заинтересованность в диссертационных исследованиях. Особую благодарность автор выражает сотрудникам отдела глубинных геофизических исследований ФГБУ «ВСЕГЕИ», а именно Е.Д. Мильштейн, Т.В. Кашубиной, А.В. Рыбалка, Д.В. Вяткиной, В.С. Львовской, Н.Н. Ефимовой, Т.М. Яваровой за помощь в сборе диссертационных материалов, советы и рекомендации в проводимых исследованиях. Отдельные слова благодарности хочется выразить П.А. Лебедкину за ценные советы при работе с сейсмическим материалом. Благодарность хочется выразить также Т.П. Литвиновой, А.А. Кирсанову, Н.В. Петушковой за содействие в проведении исследований, а также всему коллективу кафедры геофизических и геохимических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых Горного университета.

Глава 1 Особенности глубинного строения и проявления в геофизических полях, крупнейших сдвиговых зон Мира

Ключевую роль в формировании структуры земной коры и современного сейсмологического режима Забайкальского региона играет Байкало-Становая региональная сдвиговая зона (БСЗ) неоген-антропогенного возраста. В пределах этой геоструктуры происходит до нескольких сотен землетрясений в год с различной магнитудой [Имаев и др., 2005, Агеев, 2016]. Высокий уровень сейсмической опасности БСЗ обуславливает повышенное внимание к ней со стороны широкого круга ученых и специалистов со всего мира. Дополнительный интерес эта сдвиговая зона вызывает и с точки зрения геологического картирования этого региона, который характеризуется многоэтапным тектогенезом. Несмотря на значимую структурно-формирующую роль территория БСЗ остается недостаточно изученной в связи с низкой социальной инфраструктурой и громадными размерами.

Большое значение при изучении строения этой геологической структуры имеет предметный анализ результатов специализированных исследований крупнейших сдвиговых зон мира. В качестве эталонных, с точки зрения изученности, в настоящей работе выступают Сан Андреас (США) и Верхнерейнский грабен (Германия, Франция). Освещение основных параметров их морфологии позволили привнести в процесс изучения БСЗ новые идеи и предположения, которые в последствие были верифицированы при комплексной интерпретации материалов.

1.1 Тектоническая зона Сан Андреас

1.1.1 Структура земной коры региональной сдвиговой зоны Сан Андреас по данным комплексных геолого-геофизических исследований

Региональная сдвиговая зона (РСЗ) Сан Андреас формирует область перехода между Тихоокеанской и Северо-Американской литосферными плитами. Эта геоструктура простирается на сотни километров и пересекает в север-северо-западном направлении штат Калифорния - один из самых населенных и экономически значимых в США (Рисунок.1).



Рисунок 1 Положение трансформной границы Тихоокеанской и Северо-Американской литосферных плит (стрелками на географической основе показаны направления относительных движений плит)

Сдвиговая зона Сан Андреас в научной литературе часто рассматривается как типовая трансформная граница литосферных плит. Она является одной из самых сейсмически активных зон планеты: каждый год здесь происходят более 10 000 землетрясений различной магнитуды [Wallace, 1988]. В связи с высоким уровнем сейсмической опасности для зданий и сооружений этого густонаселенного региона США, здесь выполнен громадный объем специализированных геологических, геофизических и дистанционных исследований и установлены закономерности распределения тектонических дислокаций, как на дневной поверхности, так и на глубинных уровнях земной коры. Благодаря комплексному подходу в изучении данной РСЗ стало возможным решение многовариантных задач ее глубинного геологического картирования. Полученные результаты в значительной степени помогли расширить понимание физических и тектонических процессов, происходящих в земной коре в условиях активных сдвиговых деформаций.

Закономерности проявления разрывных нарушений тектонической зоны Сан-Андреас по данным геологического картирования

Геологическими съемками было установлено, что основными структурно-вещественными подразделениями региона исследований являются крупные блоки земной коры и верхней мантии, взаимные тектонические перемещения которых осуществляются вдоль межблоковых шовных зон (Рисунок 2). Определяющую роль в строении блоков играют древние докембрийские образования Северо-Американского кратона. Для глубинного разреза последнего характерно последовательное залегание (снизу-вверх) комплексов гранито-гнейсового слоя архейского кристаллического фундамента, верхнекоровых осадков и магматических комплексов эпипальпейской активной континентальной окраины Северо-Американской плиты. Аналогичные образования фиксируются в горных хребтах на всем протяжении Тихоокеанского побережья (хребты Сьерра-Невада, горно-складчатые сооружения Полуостровной провинции и др.) [Романюк и др., 2013 а)]. Наряду с горно-складчатыми сооружениями, в пределах РСЗ имеют место крупные осадочные бассейны с мощностью осадков до 12 км («Великая Долина», «Вентура») и многочисленные небольшие кайнозойские впадины.

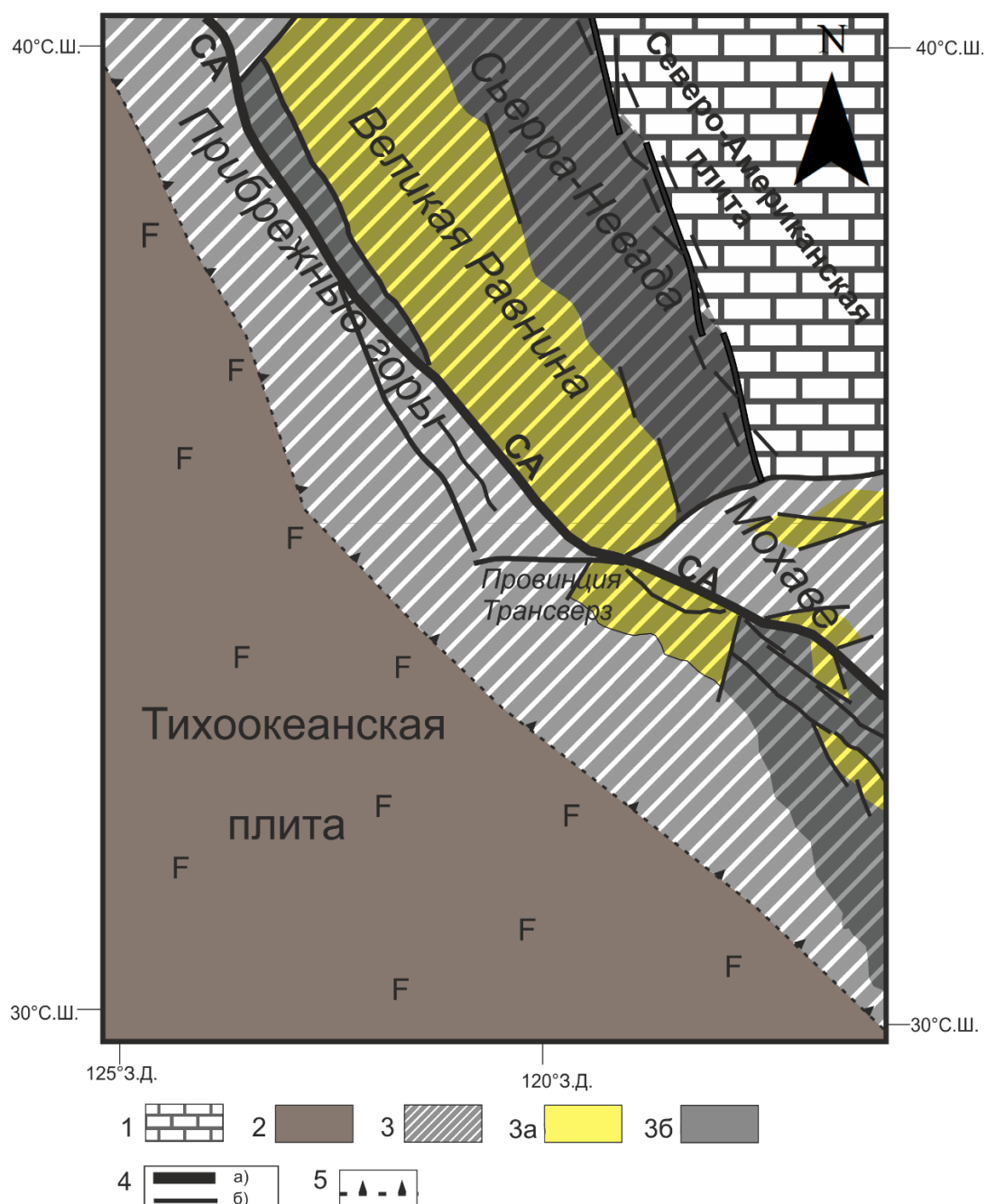


Рисунок 2 Схема зонально-блокового строения региональной сдвиговой зоны Сан Андреас по [S. Shulz, R.Wallace,1990] в редакции автора)

Условные обозначения: 1- континентальная кора; 2 – океаническая кора; 3 – кора переходного типа, перекрывающаяся 3а) осадочными отложениями, 3б) – гранито-гнейсовыми образованиями. 4 – тектонические нарушения: а) магистральный шов Сан Андреас, б) оперяющие дислокации, в) –разломы смежных сдвиговых зон; 5 – палеограница зоны субдукции по [Langreheim et al, 2012]

Согласно данным петрографических исследований вблизи плоскости разломов широко проявлены трещиноватые и высокопористые породы. При удалении от разлома количество трещин и пор постепенно снижается. Доминирующими породами в пределах межблоковых зон

являются катаклазиты и милониты, развивающиеся по древнему кристаллическому субстрату [S. Shulz, R. Wallace, 1990]

В процессе геологического картирования РСЗ были выявлены многочисленные структурные несогласия. Наибольшие значения латеральных перемещений блоков с амплитудой до 560 км установлены в пределах главного шва Сан Андреас. Для оперяющих дислокаций фиксируются амплитуды горизонтальных смещений до 240 км. Результаты аналогичных исследований в пределах смежных сдвиговых зон Уолкер Лэйн и Восточно-Калифорнийской сдвиговой зоны свидетельствуют о наличии смещений блоков с амплитудами до 150 км [M. Hill и T. Dibble, 1953; и др.]. Эти наблюдения указывают факт того, что доминирующей сдвиговой структурой региона, аккумулирующей максимальные доли сдвиговых перемещений Тихоокеанской и Северо-Американской литосферных плит, является разлом Сан Андреас, в то время как развитая разломная сеть периферийных зон отражает смещения отдельных блоков.

Таким образом, геологическими съемками было установлено, что ареал развития региональной сдвиговой зоны Сан Андреас имеет сложную зонально-блоковую структуру. Крупные блоки земной коры перемещаются вдоль тектонических нарушений, формирующих межблоковые зоны. Максимальные перемещения блоков отмечаются вдоль магистрального шва Сан Андреас, а латеральные смещения с меньшими амплитудами наблюдаются в пределах обширной сети оперяющих дислокаций, а также субпараллельно развивающихся сдвиговых зон.

Закономерности проявления тектонических нарушений РСЗ Сан-Андреас по данным космоснимков

Данные космических снимков оказались весьма информативны при изучении закономерностей пространственного расположения тектонических нарушений на дневной поверхности

По результатам дешифрирования космоснимков магистральный шов Сан Андреас отчетливо маркируется контрастными зонами перехода между линейно-вытянутыми горными хребтами и впадинами аналогичной ориентации; прерывистыми или латерально смещенными фрагментами речных русел. Практически на всем протяжении (около 1200 км) магистральный шов Сан Андреас характеризуется прямолинейными сегментами. Его аномальной особенностью является изгиб, именуемый «The Big Bend». Результаты дешифрирования космоснимков в области изгиба свидетельствуют о развитии в его обрамлении нескольких оперяющих дислокаций, которые сочленяют Сан Андреас со смежными системами разломов Уолкер Лэйн и Восточно-Калифорнийской сдвиговой зоной. Эта закономерность чрезвычайно интересна, поскольку подобный характер дислокаций отмечается автором в областях развития Монголо-Охотского шва и Байкало-Становой РСЗ.

Пространственное расположение на дневной поверхности многочисленных оперяющих и второстепенных дислокаций отчетливо устанавливается по результатам дешифрирования крупномасштабных космоснимков. Среди них выделяются тектонические нарушения, имеющие наиболее контрастное проявление в рельефе (разломы Калаверас, Хэйвард, Маакама, Сан Джасинто, Элсинор, Сан Габриэль и др.). Они характеризуются большей протяженностью (от 150 км до 350 км) и в некоторых случаях имеют свой набор оперяющих дислокаций, как например, разломы Хэйвард и Сан Габриэль. В связи с этим, автором предлагается выделить вышеупомянутые тектонические нарушения в отдельную группу оперяющих разломов первого ранга. Остальные дислокации, которые играют меньшую роль в аккумуляции тектонических движений, предлагается их выделить в группу разломов 2-го ранга (Рисунок 3).

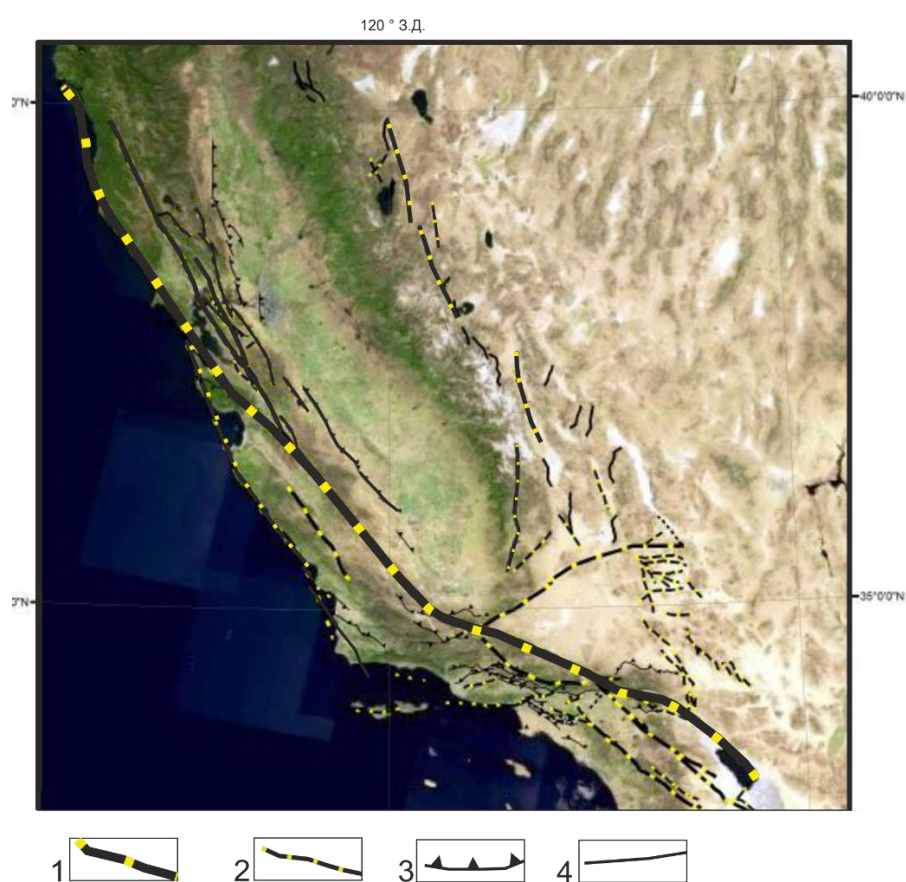


Рисунок 3 Распределение тектонических нарушений РСЗ Сан Андреас и смежных сдвиговых зон Уолкер Лэйн и Восточно-Калифорнийской сдвиговой зоны на космоснимке LANDSAT 7 [по материалам американской геологической службы, URL: <https://earthquake.usgs.gov/hazards/qfaults/>].

Условные обозначения: 1 – главный шов Сан Андреас; 2 – оперяющие разломы и разломы смежных сдвиговых зон сдвиговой кинематики; 3 – надвиги; 4 - сбросы

Результаты дешифрирования дистанционных основ в пределах субпараллельных региональных систем разломов (Уолкер Лэйн и Восточно-Калифорнийская сдвиговая зона)

также отражают контрастное проявление разломов в рельефе. Индикаторами тектонических нарушений служат латеральные смещения объектов природного ландшафта, вытянутые речные и озерные террасы, а также упорядоченные цепочки борозд и седловин. Протяженность отдельных разломов оценивается первыми десятками километров. Важной особенностью этих тектонических зон является отсутствие единой шовной структуры и проявления многочисленных отдельных разрывных нарушений, что позволяет связывать формирование данных «вспомогательных» сдвиговых зон с процессом релаксации всего объема тектонических напряжений, накапливающегося при взаимных перемещениях литосферных плит вдоль главной сдвиговой структуры Сан Андреас.

Важными результатами дешифрирования космоснимков являются заключения о том, что многочисленные дислокации РСЗ Сан Андреас увязываются в сложный рисунок, который может быть интерпретирован с помощью теоретической модели правосдвигового эллипсоида деформаций.

*Закономерности проявления тектонических нарушений по результатам исследований
потенциальными геофизическими методами.*

На территорию штата Калифорния созданы сводные картографические основы потенциальных полей масштаба 1: 250 000. Отдельные участки этой зоны откартированы более детальными съемками.

Гравиметрические съемки. Анализ закономерностей расположения аномалий гравитационного поля в редукции Буге позволяет говорить о том, что магистральному шву Сан Андреас отвечает линейная зона пониженных значений поля силы тяжести. Интенсивность отрицательных аномалий варьирует от -15 до -30 мГл [Domenico, 1967; Langenheim и др, 2001]. Аномалии в пределах оперяющих дислокаций сохраняют пониженные значения, однако интенсивность отдельных из них превышает значения, наблюдаемые над магистральным швом Сан Андреас [Wooley и Langenheim, 2001].

Эти особенности геофизического проявления тектонических нарушений могут свидетельствовать о развитии в разрезе зоны Сан-Андреас ареала интенсивной деструкции (разуплотнения, повышения трещиноватости) земной коры. Отсутствие каких-либо положительных локальных аномалий поля силы тяжести в пределах этой зоны позволяет предполагать отсутствие значимых перемещений (экзугмации) глубинных сегментов земной коры и верхней мантии на приповерхностные уровни.

Магнитометрические съемки. Наряду с результатами гравиметрических съемок, дополнительную информацию о структурно-вещественных неоднородностях РСЗ несут данные магнитометрических съемок.

На региональном уровне карта магнитного поля отражает зонально-блоковое строение региона, хотя, и менее выразительно, чем гравитационное поле. Пространственный анализ инфраструктуры магнитного поля позволяет разделить относительно однородные внутренние области стационарных блоков от градиентных межблоковых зон. Результаты анализа данных магнитометрических съемок позволяют определить взаимное расположение тектонических нарушений РСЗ. Анализ полученной картины подтверждает возможность интерпретации дислокаций РСЗ Сан Андреас с помощью теоретической модели правосдвигового эллипсоида деформации.

Таким образом, результаты качественной интерпретации потенциальных геофизических полей отражают зонально-блоковую структур земной коры РСЗ Сан Андреас. Блоки характеризуются выдержанными значениями геофизических параметров, а межблоковым структурам отвечают зоны градиентов.

Закономерности проявления тектонических нарушений по сейсмологическим данным

Пространственный анализ очагов землетрясений отчетливо свидетельствует о том, что высокий уровень сейсмичности наблюдается вдоль полосовых зон, шириной до первых километров главного и оперяющих разломов. Количество сейсмических событий при удалении от этих шовных зон к внутренним областям блоков резко уменьшается. Этот феномен может свидетельствовать о том, что блоки по большей части являются сейсмически наиболее стабильными областями земной коры. Можно предполагать, что тектонические напряжения внутри блоков существенно меньше, а деформации земной коры выражены здесь слабее (Рисунок 4).

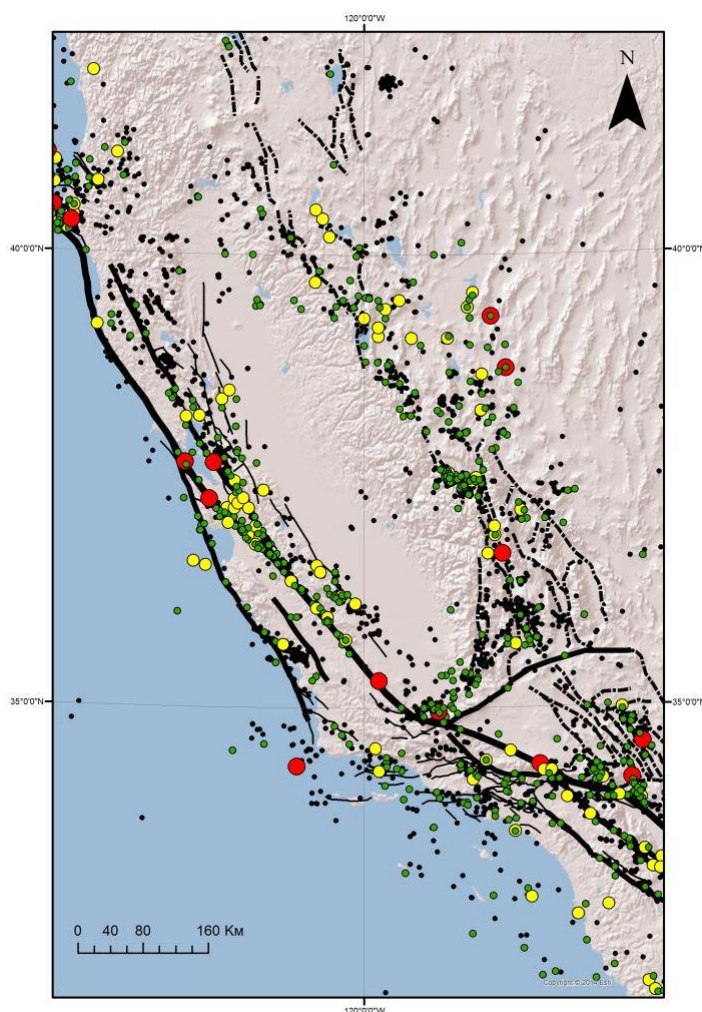
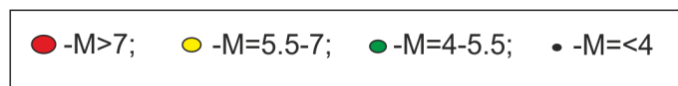


Рисунок 4 Распределение сейсмических очагов в пределах РСЗ Сан Андреас, а также смежных региональных сдвиговых зон [по материалам американской геологической службы].

Условные обозначения: магнитуа землетрясений: М – магнитуа землетрясения



Данные о магнитуах сейсмических событий свидетельствуют о том, что основная доля разрушительных землетрясений за период инструментальных наблюдений локализовалась вдоль магистрального шва Сан Андреас. Однако очаги с $M>6$ наблюдаются также вдоль оперяющих дислокаций и в пределах Уолкер Лэйн и Восточно-Калифорнийской сдвиговой зоны, что подтверждает их вовлечение в релаксацию общего объема напряжений при взаимных перемещениях литосферных плит.

Детальный анализ очагов землетрясений региональной сдвиговой зоны Сан Андреас позволяет оценить кинематический тип магистрального шва и оперяющих тектонических нарушений. Анализ механизмов очагов землетрясений свидетельствует о присутствии сложных комбинаций тектонических движений в пределах всей РСЗ (Рисунок 5). Кинематические

характеристики магистрального шва отражают наличие преимущественно чистых правосдвиговых подвижек вдоль него. Разноранговые опережающие дислокации Сан Андреас в основном унаследуют схожую кинематику.

Результаты аналогичных исследований в пределах смежных сдвиговых зон устанавливают, что доминирующими также являются сдвиговые движения, однако здесь также присутствуют взбросовые и сбросовые составляющие. Характерно, что сдвиг с растяжением фиксируется преимущественно в области развития системы разломов Уолкер Лэйн, а сдвиг с сжимающей компонентой - в Восточно-Калифорнийской сдвиговой зоне. Устанавливается, что смена кинематического типа тектонических дислокаций происходит в области изгиба магистрального шва, где отмечается наличие нескольких «запертых» зон, в пределах которых в прошлом отмечены крупные землетрясения [Романюк и др., 2013б)]. Выделенная особенность чрезвычайно интересна, так как аналогичными исследованиями в пределах Байкало-Становой сдвиговой зоны исследователями также устанавливается смена кинематических характеристик разломов со сбросо-сдвиговых на сдвигово-надвиговые в пределах ее наибольшего изгиба (среднее течение р. Олекма) [Имаев и др., 2015].

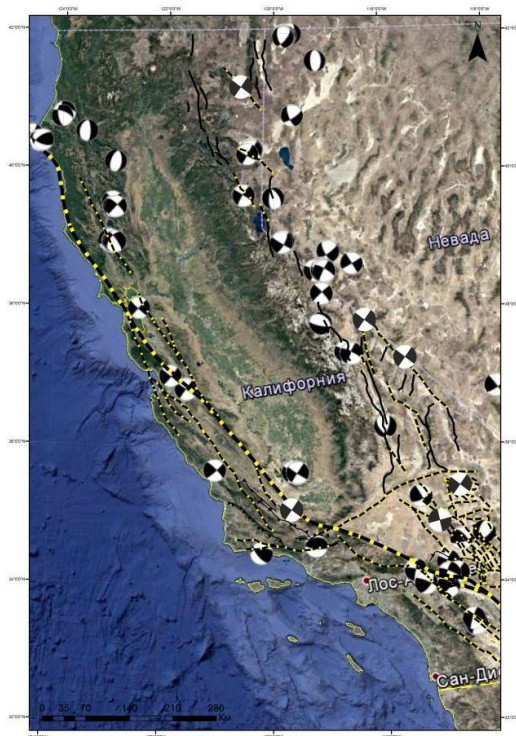


Рисунок 5 Кинематические характеристики тектонических нарушений переходной зоны Северо-Американской и Тихоокеанской литосферных плит [по материалам американской геологической службы URL: <https://earthquake.usgs.gov/hazards/qfaults/>]

Условные обозначения:  - механизм очага землетрясения: белые области отражают области растяжения, закрашенные – области сжатия

Особенности проявления РСЗ Сан-Андреас в тепловом поле

Несмотря на относительно невысокую информативность, данные теплового потока позволяют получить дополнительные аргументы в пользу вывода о зонально-блоковом строении земной коры региона. Анализ результатов геотермических исследований свидетельствует о том, что межблоковые зоны, вдоль которых происходят тектонические движения, характеризуются повышенными значениями теплового потока (от 70 мВт/м² и выше). Центральным частям блоков, в пределах которых разломы проявлены относительно слабо, в тепловом поле отвечают ареалы пониженных значений (около 20-30 мВт/м²)

Таким образом, по результатам комплексных геолого-геофизических и сейсмологических исследований было установлено зонально-блоковое строение земной коры РСЗ Сан Андреас. Коровые блоки земной коры РСЗ по результатам интерпретации геолого-геофизических и сейсмологических материалов соответствуют выдержанным значениям параметров, в то время как межблоковые зоны маркируются различными их градиентными значениями. В составе сети тектонических нарушений РСЗ, в пределах которой происходит взаимное тектоническое перемещение блоков литосферных плит, была выделена иерархическая система тектонических дислокаций, доминирующую роль в которой играет магистральный шов Сан Андреас. Оперяющие дислокации различных морфокинематических типов обширно проявлены вдоль главного шва и на месте его изгиба сочленяют эту трансформную границу со смежными сдвиговыми зонами Уолкер Лэйн и Восточно-Калифорнийской сдвиговой зоной.

1.1.2 Особенности глубинного строения земной коры РСЗ Сан Андреас

Наиболее информативные данные о строении земной коры РСЗ Сан Андреас были получены в результате обработки глубинных сейсмических профилей методами отраженных (МОВ) и преломленных (МПВ) волн. Наряду с этим отмечено, что существенную информацию о глубинном строении несут в себе результаты геоэлектрических исследований, плотностного и магнитометрического моделирования. Эти материалы подкрепляются данными о распределении очагов землетрясений и величинах теплового потока, что позволяет наиболее полноценно изучать земную кору РСЗ Сан Андреас.

Особенности глубинного строения верхней коры по результатам сейсморазведочных исследований

Зонально - блоковая структура земной коры РСЗ, параметры которой отмечены на дневной поверхности, прослеживается и на глубинных уровнях. На сейсмических разрезах МОВ стационарные области проявляются выдержанным характером волнового поля. При переходе к межблоковым зонам инфраструктура сейсмического поля резко меняется: наблюдаются пачки крутопадающих и наклонных отражений, чередование зон сейсмической прозрачности и повышенной рефлексивности (областей сгущения отражающих площадок) (Рисунок 6)

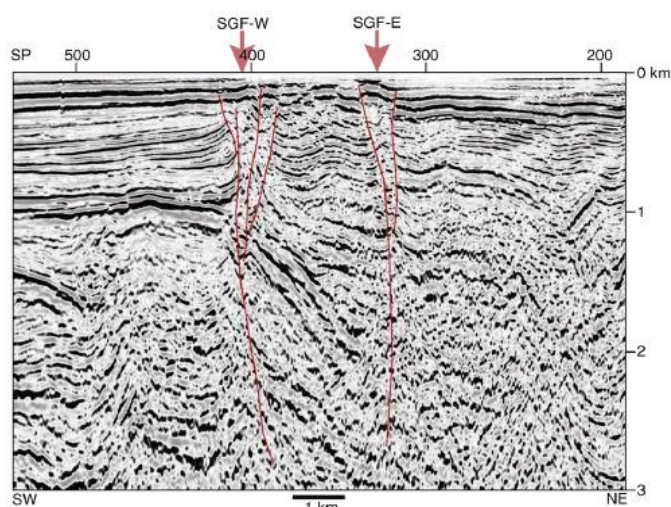


Рисунок 6 Сейсмический разрез МОВ вдоль профиля в бухте Сан Франциско по [Ryan и др., 2001]

Условные обозначения: SGF-W – разлом Сан Грегорио (западный), SGF-E – разлом Сан Грегорио (восточный)

Результаты исследования скоростных параметров земной коры свидетельствуют о том, что межблоковые зоны на глубинах верхней коры часто проявляются ареалами пониженных значений скоростей продольных (P) и поперечных (S) волн [Murphy и др., 2010] (Рисунок 7).

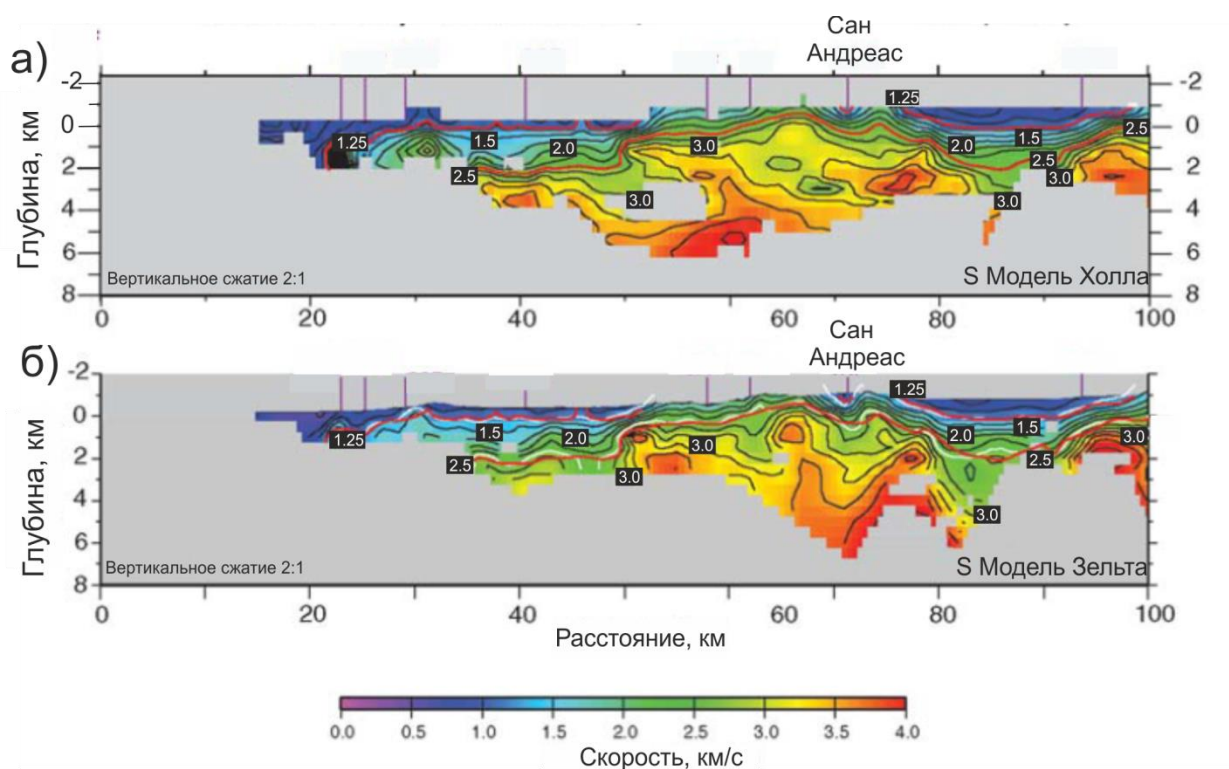


Рисунок 7 Скоростная модель поперечных волн вдоль профиля LARSE II (провинция Поперечных хребтов) по Murphy, 2010.

9а) – Модель по [Hole, 1992], 9б) – Модель по [Zelt и Barton, 1998]. Красные линии на обоих моделях соответствуют 1.25 и 2.5 км/с

Интересной особенностью, установленной по результатам сейсморазведочных исследований, является картирование в земной коре Сан Андреас на глубинах от 15 до 22 км субгоризонтального слоя повышенной концентрации высокоамплитудных отражающих площадок [Brocher и др., 1994]. Было установлено, что данный высокореклефтивный слой прослеживается не только под трассой разлома Сан Андреас, но также фиксируется и в области оперяющих разломов Хэйвард, Калаверас. Результаты скоростного моделирования свидетельствуют о наличии на этих глубинных уровнях слоя повышенных значений сейсмических скоростей ($V_p = 6.9$ км/с).

Особенности глубинного строения верхней коры по результатам электроразведочных исследований

Результаты магнитотеллурических исследований Рисунок 8 в пределах Сан Андреас свидетельствуют о том, что межблоковые зоны отчетливо проявляются на геоэлектрических разрезах как градиентные области в окружении выдержанных значений поля, соотносимых с относительно стационарными блоками.

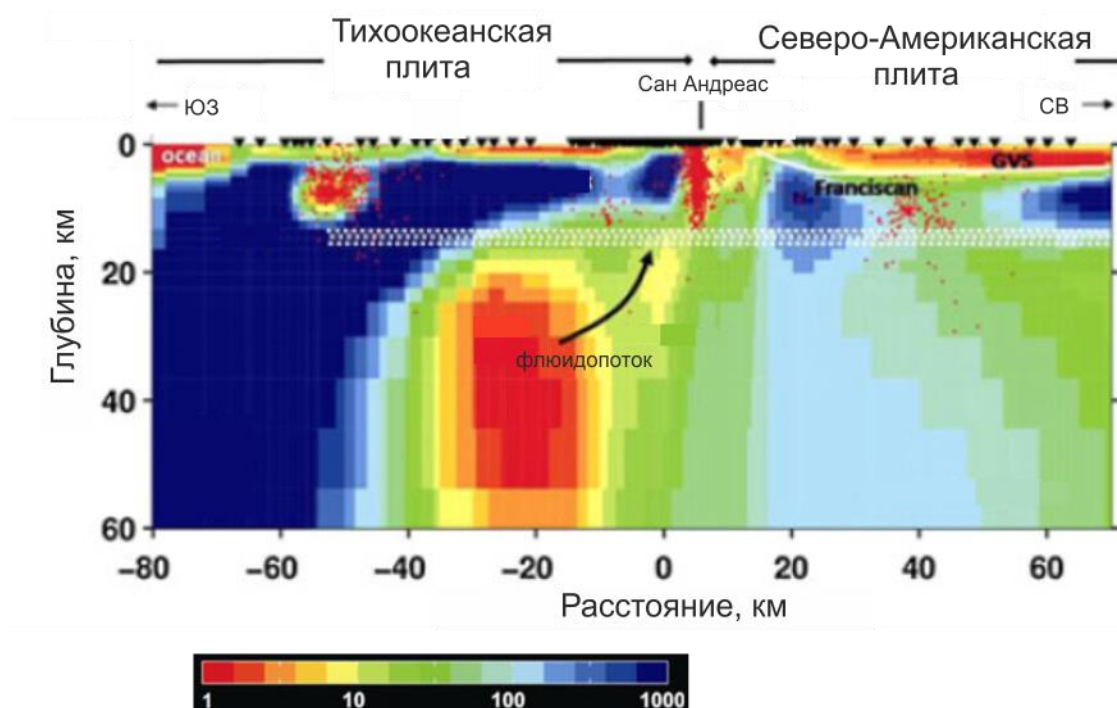


Рисунок 8 Геоэлектрический разрез по [Becken и Ritter, 2012] (шкала отражает сопротивление). Очаги землетрясений за период с 2002 по 2008 (красные точки). Крапом показана подошва сейсмогенной коры

В пределах верхней коры межблоковым зонам соответствуют ареалы пониженных сопротивлений, которые могут быть обусловлены высокой степенью тектонической деструкции горных пород, а также присутствием коровых флюидов. Нижняя кора отчетливо выделяется по смене инфраструктуры разреза (пологие аномалии). На этих горизонтах в пределах межблоковых зон отмечается наличие областей высокой проводимости. Исследователи отмечают, что эти аномальные зоны отражают присутствие глубинных флюидов, которые, проникая на приповерхностные уровни, уменьшают прочность горных пород межблоковых зон и как следствие влияют на мощность сейсмогенной зоны [Becken и др., 2011; Maskie и др., 1997]. Предполагается, что данные флюидопотоки поднимаются с глубин верхней мантии через зону литосферной деструкции. В этом случае можно предполагать, что область разрыва сплошности литосферы образовалась в результате слома субдукционного слэба, произошедшее в начале кайнозоя. Автор предполагает, что в пределах сдвиговых зон вполне возможен и другой механизм образования подобной области деструкции. Например, в пределах Верхнерейнского грабена и Байкало-Становой региональной сдвиговой зоны эту роль выполняют процессы рифтогенеза, в результате проявления которых формируется радикальное утонение литосферы.

Распределение очагов землетрясений в вертикальном измерении в земной коре PC3 Сан Андреас

Анализ распределения очагов землетрясений в сечениях разрезов земной коры свидетельствует о том, что мощность сейсмогенной зоны в пределах PC3 Сан Андреас и смежных систем разломов не превышает 20 км. Существенное увеличение глубин очагов сейсмичности наблюдается в северной части PC3, вблизи области, где еще продолжают субдукционные процессы

Наряду с короткопериодными сейсмическими событиями верхней коры, в области магистрального шва наблюдаются глубинные (от 20 до 40 км) низкочастотные (30 Гц и выше) землетрясения, так называемые «треморы» [Shelly и Hardebek, 2010; Shelly и Johnson, 2011] (Рисунок 9).

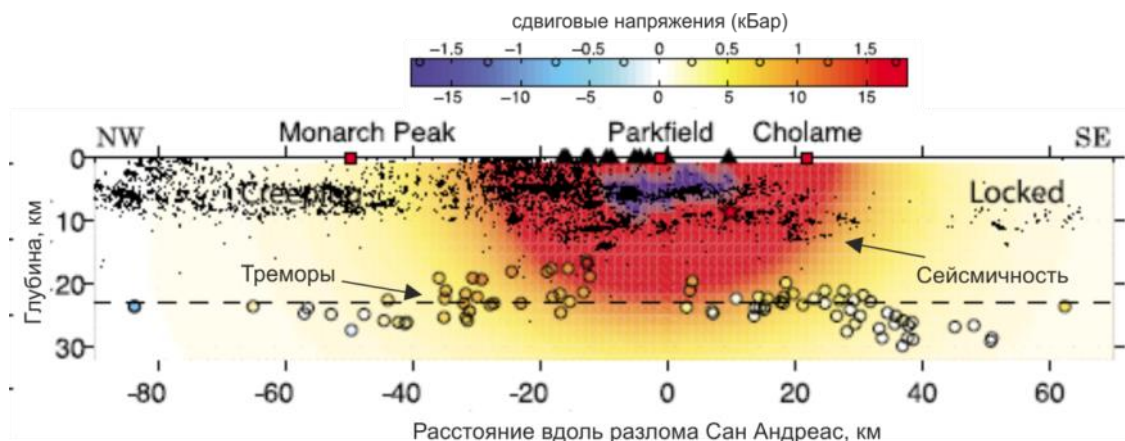


Рисунок 9 Схематический разрез, отражающий распределение высокочастотных землетрясений в верхней коре и низкочастотных треморов в нижней. Закрашенные области отражают ареал распространения напряжений в коре от землетрясения 2004 г с $M=6.0$ по [Shelly и Johnson, 2011]

События такого типа отличаются от обычных приповерхностных землетрясений тем, что могут длиться в течение десятков минут, при этом не фиксируется интенсивного высвобождения сейсмической энергии. Исследователи интерпретируют наличие этих событий как проявления глубинного шва разлома Сан Андреас [Романюк и др., 2013б].

Результаты реологического моделирования для земной коры PC3 Сан Андреас

Результаты реологических исследований, направленных на изучение зависимости прочности от глубины залегания породы сдвиговой зоны, свидетельствуют о том, что значительный контраст сейсмической активности между верхней и нижней корой может объясняться изменением типа деформаций в вертикальном измерении. Реологическое состояние горных пород зависит от множества факторов, среди которых наибольшее значение придается

величине теплового потока, фиксируемого на поверхности. Сопоставление результатов исследований реологии кварца и полевого шпата для земной коры Сан Андреас свидетельствуют о ее радикальной дифференциации по реологическим характеристикам. Верхняя кора характеризуется «хрупкими» деформациями, контролируемые трением по закону Брайля (линейная зависимость между силой трения и глубиной) [Byrlee, 1978]. Дальнейший рост силы трения приводит к активизации процессов ползучести, которые снижают прочностные характеристики пород и увеличивают долю вязких деформаций. Субгоризонтальный слой изменения режима деформации, именуемый «слой хрупко-пластичного перехода» (ХПП) [Burgmann и Dresen 2008]. Горные породы, залегающие в его пределах, обладают нелинейно-вязкими свойствами. Результаты анализа полученной зависимости свидетельствует о том, что наиболее прочной областью, наряду с верхней корой, является верхняя мантия. Нижняя кора, заключенная между ними, обладают повышенной вязкостью (Рисунок 10).

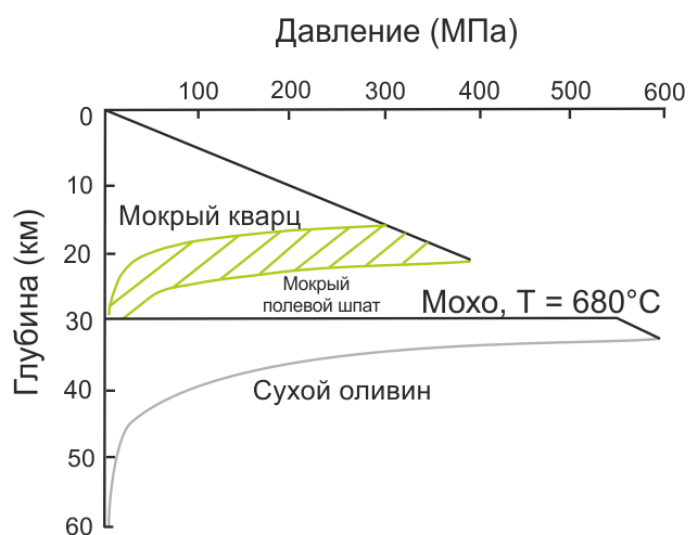


Рисунок 10 Прогнозная реологическая модель при сдвиговом тектоническом режиме с предполагаемой однородной скоростью деформирования $\dot{\epsilon}=10^{-14} \text{ с}^{-1}$ по [Burgmann и Dresen, 2008].

Установлено, что в ареалах повышенного теплового потока (Q), глубины залегания ХПП поднимаются к дневной поверхности, а в условиях пониженных значений Q – глубины ХПП наоборот увеличиваются [Романюк и др., 2013б)]. Не смотря на это, наиболее достоверным индикатором наличия слоя ХПП в любой ситуации является кардинальное понижение количества очагов землетрясений.

1.1.3 Форма тектонических нарушений в земной коре РСЗ Сан Андреас

Форма тектонических нарушений в пределах верхней коры РСЗ Сан Андреас

Результаты моделирования тектонических нарушений в пределах верхней коры являются наиболее достоверными. В процессе сопоставления результатов инверсионных гравиметрических и магнитометрических задач с высокоточными данными о глубинах землетрясений было установлено, что на приповерхностных уровнях (2-3 км) магистральный шов Сан Андреас характеризуется близвертикальным падением. Его форма на глубинных горизонтах (ниже 7 км) принимает листрический характер. Оценки углов падения плоскости разлома варьируют от 70^0 до 50^0 с приближением к максимальным значениям на глубинах 15-20 км [Langergheim и др., 2014]. Многочисленные опережающие дислокации и разломы смежных сдвиговых зон также имеют пологий (наклонный характер). Наименьшими углами падения характеризуются тектонические нарушения системы Уолкер Лэйн (до 30^0). Анализ пространственного распределения очагов землетрясений вокруг разломов качественно свидетельствует о размерах зоны тектонического влияния. Резкое уменьшение количества бочагов наблюдается в пределах первых километров при удалении от плоскости разлома.

Совместная интерпретация данных сейсморазведочных исследований и других геофизических методов, позволяют установить наличие в пределах РСЗ Сан Андреас «положительных» и «отрицательных» «цветковых» структур (flower structure), которые образуются в результате сочленения опережающих дислокаций и главного шва и являются отражением сложных тектонических процессов.

Морфология тектонических нарушений РСЗ Сан Андреас на глубинных уровнях земной коры

В связи с высокой неоднозначностью получаемых данных относительно глубинных горизонтов земной коры, наиболее дискуссионным вопросом на сегодняшний день является определение пространственного расположения и формы глубинного канала магистрального шва. В настоящее время существует две точки зрения на эту проблему. В первой из них предполагается субвертикальный характер глубинного шва, который расположен непосредственно под трассой разлома, закартированной на поверхности [Zhu, 2000]. Альтернативные научно-теоретические заключения указывают на фундаментальное значение слоя ХПП. Учитывая результаты реологического моделирования, они заключают, что этот слой может рассматриваться как зона ослабленных горных пород (детачмента), в пределах которой, при достижении определенной величины сдвиговых напряжений, могут происходить латеральные смещения как отдельных фрагментов горных пород, так и крупных структурных элементов. По представлениям исследователей в результате такого горизонтального сдвига

может происходить латеральное смещение глубинного канала вглубь континента [Hadley и Kanamori, 1977; Holebrook и др., 1996] (Рисунок 11).

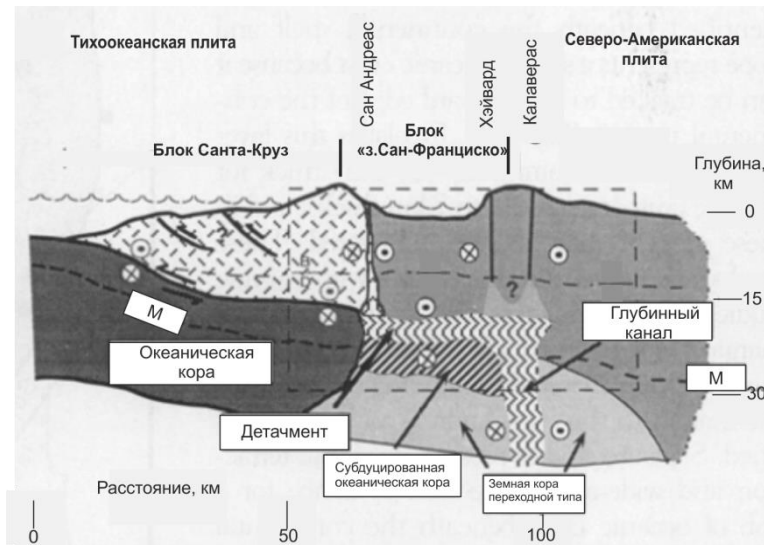


Рисунок 11 Схема глубинного строения РСЗ Сан Андреас по [Brocher и др., 1994]

Данный вариант существенно подкрепляется результатами исследований о влиянии латеральных тектонических потоков в литосфере на крупномасштабные структурно-вещественные преобразования. [Леонов 2001, 2008, Лукьянов, 1980, 1991, Паталаха и др. 1995]. Необходимо отметить, что данные научно-теоретические заключения представляют большой интерес при исследовании глубинной морфологии Байкало-Становой региональной сдвиговой зоны.

Выводы

Таким образом, по результатам комплексных исследований строения земной коры РСЗ Сан Андреас закартирована ее зонально-блоковая структура. Взаимные перемещения Северо-Американской и Тихоокеанской литосферных плит локализуются вдоль главного шва и разветвленной системы оперяющих дислокаций и межблоковых зон. Эти зоны отчетливо маркируются градиентами геофизических полей, контрастно проявляющихся на фоне выдержанных значений внутренних областей стационарных блоков. В пределах этих зон на порядки повышается количество тектонических нарушений, доминантой среди которых, является магистральный разлом Сан Андреас. Общая картина пространственного распределения тектонических нарушений может быть интерпретирована с использованием теоретической модели правосдвигового эллипсоида деформации.

Характерной особенностью этой РСЗ является ее пространственное сочленение по системе оперяющих дислокаций с параллельно развивающимися Уолкер Лэйн и Восточно-

Калифорнийской сдвиговыми зонами. В пределах этих смежных сдвиговых зон происходит локальное перемещение блоков земной коры.

Выделенная на дневной поверхности зонально-блоковая структура имеет свое проявление и на глубинных разрезах и моделях земной коры. Межблоковые зоны маркируются градиентными областями геофизических полей, в то время как заключенные между ними коровые блоки соответствуют относительно однородному характеру геофизических полей. Интенсивность аномалий от структурно-вещественных неоднородностей не постоянна и варьирует в широких пределах, но общий характер их проявления остается подобным (линейно-вытянутые, полосовые зоны).

Тектонические нарушения имеют листрический характер и достигают максимальных углов наклона вблизи зоны высокой рефлексивности (15-20 км). Глубины, на которых замыкается этот слой, коррелируют с областями ХПП в земной коре. Учитывая снижение прочности горных пород в последнем, предполагается, что на этих глубинных горизонтах развиваются субгоризонтальные зоны деструкции, пространственно соединяющие тектонические нарушения и аккумулирующие латеральные смещения фрагментов горных пород.

1.2 Тектоническая зона Верхнерейнского грабена

1.2.1 Структура земной коры тектонической зоны Верхнерейнского грабена по данным комплексных геолого-геофизических исследований

Верхнерейнский грабен (ВРГ) является наиболее детально изученной внутриконтинентальной сдвиговой зоной Центральной Европы. Развиваясь в север-северо-восточном направлении, грабен пересекает границы Германии и Франции и далее трассируется в акватории Северного моря. Тектоническая зона ВРГ характеризуется повышенным уровнем сейсмичности, что представляет значительную опасность для социальной инфраструктуры и агропромышленного комплекса этих стран. Глубинное геологическое строение этой зоны изучалось на протяжении XX века с использованием громадного объема специализированных геолого-геофизических исследований. В результате был получен уникальный материал о глубинном строении этой зоны, который позволил исследователям значительно углубить понимание структуры, состава земной коры и происходящих в ней процессов в условиях активной тектоники.

Проявление тектонических нарушений по данным геологического картирования

Заложение и развитие этой структуры связывается с процессами инденторного воздействия Адриатической микроплиты на окраину Евразийской плиты в ходе альпийского орогенеза. Исследователями этого региона отмечается, что структура сочетает в себе черты региональной рифтовой зоны и регионального сдвига [Schumacher, 2002].

Основными структурно-вещественными подразделениями ареала развития ВРГ являются блоки земной коры, сочленение которых происходит вдоль развитой сети тектонических нарушений. В регионе картируются такие крупные блоки как Рейнский массив, Возгезы, Черный Лес, Саксотурингский и Молданубинский, Швабский. Глубинными границами этих блоков являются главные швы Верхнерейнской сдвиговой зоны и деформации их тектонического оперения (Рисунок 12).

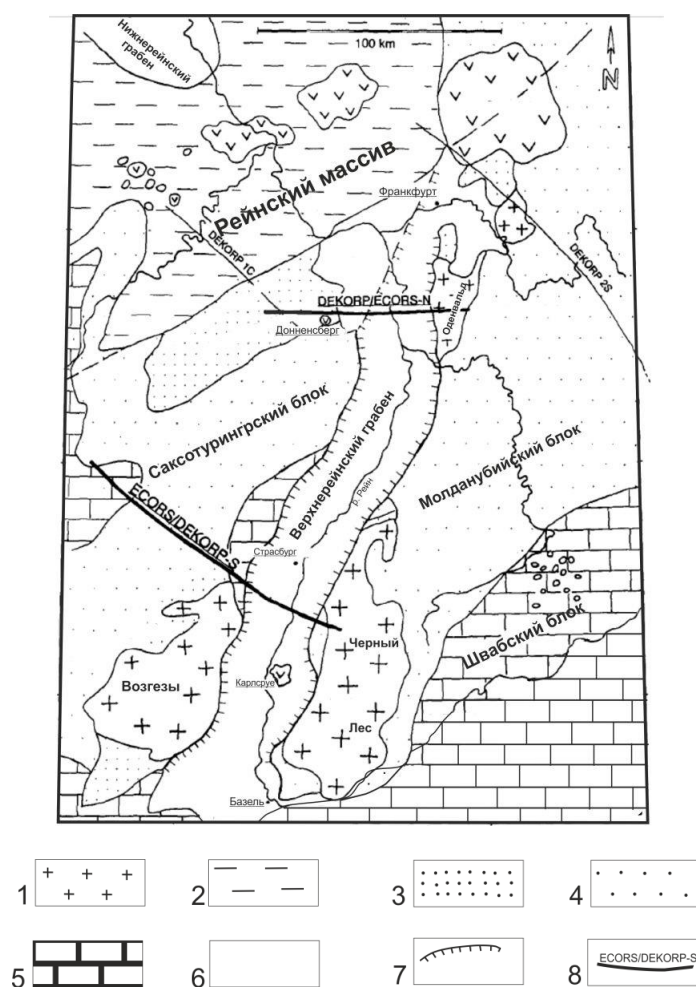


Рисунок 12 Схема основных структурно-вещественных подразделений области развития ВРГ по Wenzel, 1997

Условные обозначения: 1- гранито-гнейсовый кристаллический фундамент; 2–6 разновозрастные осадочные отложения: 2 - – девонские метаморфизованные; 3 – позднепалеозойские; 4 – триасовые; 5 – юрские; 6 – третичные; 7 – граничные разломы Верхнерейнского грабена; 8 – глубинные сейсмические профили, отработанные в рамках программы по изучению глубинного строения континентальной земной коры.

Разрез грабена слагают архейские породы герцинского консолидированного фундамента, которые перекрываются толщами мезозойских и кайнозойских осадков [Schumacher, 2002] (Рисунок 13).

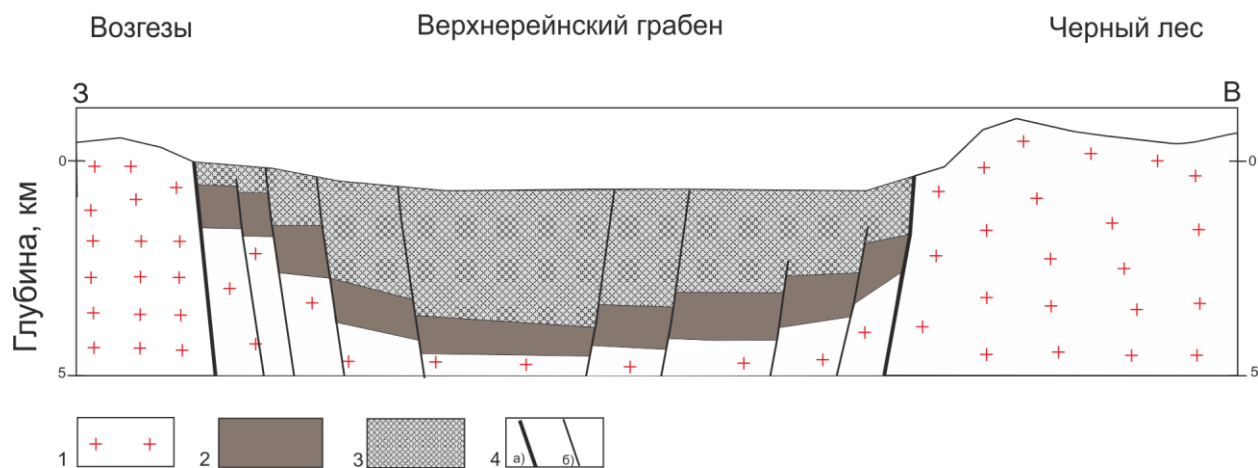


Рисунок 13 Схематический геологический разрез Верхнерейнского грабена по [Buness и др., 2010].

Условные обозначения: 1 - гранито-гнейсы кристаллического фундамента; 2 - мезозойские осадочные отложения (песчаники, известняки); 3 - кайнозойские осадочные отложения (мергели); 4 – разрывные нарушения: а) – «граничные» разломы, б) – внутриграбеновые разломы.

Структура зоны Верхнерейнского грабена по данным геофизических исследований

В поле силы тяжести ВРГ отвечает ареал пониженных значений интенсивностью до -60мГл . В магнитном поле этой структуре также соответствует ареал пониженных значений (до -50нТл).

По данным исследований потенциальными методами и материалам дистанционных зондирований в пределах зоны картируется развитая сеть тектонических нарушений. Разломы характеризуются преимущественной юг-юго-западной и север-северо-восточной ориентациями. Протяженность большинства из них ограничивается первым десятком километров. Из всего многообразия разрывных дислокаций зоны исследователи выделяют «граничные» разломы, которые картируются на протяжении более чем 200 км вдоль бортов грабена и отделяют внутреннюю часть грабена от его «крыльев» и смежных блоков земной коры [Campos- Enríquez и др., 1992]. Исследователями отмечается их контрастное проявление в геофизических полях и на космоснимках (резкая смена инфраструктуры поля, высокий градиент рельефа) [Ziegler, 1992] (Рисунок 14). Эти доминанты имеют множество оперяющих дислокации, простирающихся по обе стороны от них.

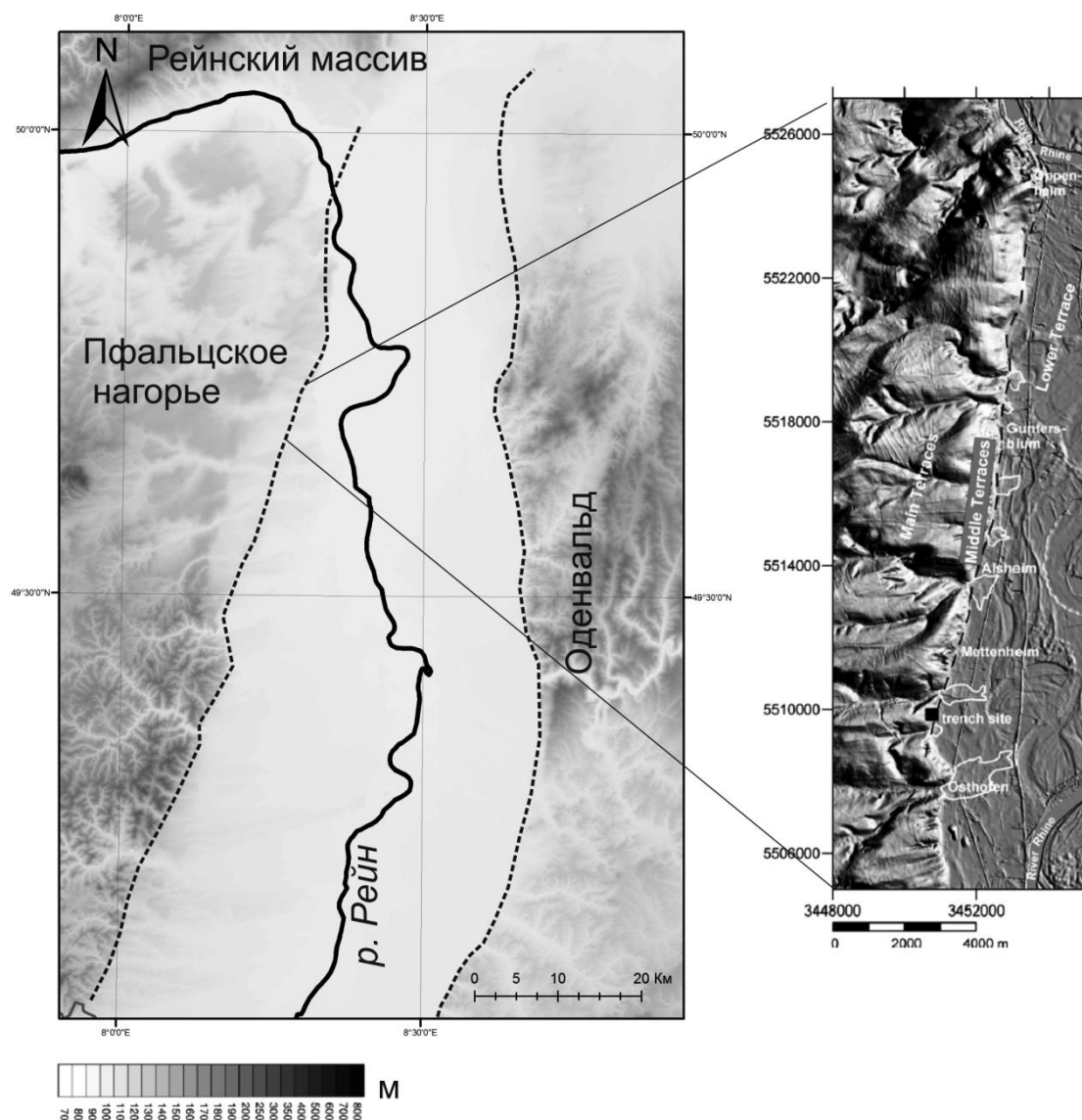


Рисунок 14 а) Цифровая модель рельефа тектонической зоны Верхнерейнского грабена (пунктирной линией выделены границы грабена по [Gwendolyn, 2007]; б) космоснимок высокого разрешения по фрагменту западного граничного разлома; белые полигоны обозначают конуса выноса.

Анализ вышесказанных заключений позволяет провести ранжирование тектонических нарушений ВРГ и присвоить граничным разломам первый ранг. Оперяющие дислокации и разломы, развивающиеся внутри грабена, в силу их небольшой протяженности и невысокого контраста в геофизических полях, предложено выделить в группу разломов второго ранга.

По результатам геотермических исследований установлено, что зона Верхнерейнского грабена характеризуется ареалами повышенных значений теплового потока. Интенсивность аномалий в северной части грабена достигают 80 мВт/м^2 , в центральной – до 150 мВт/м^2 и в южной – до 120 мВт/м^2 [Freymark и др., 2017].

Сейсмологические исследования привносят дополнительную информацию о пространственном распределении современных тектонических нарушений. Анализ распределения очагов землетрясений свидетельствует о повышенной концентрации последних в приальпийской области ВРГ. В северной части структуры уровень сейсмичности снижается (Рисунок 15).

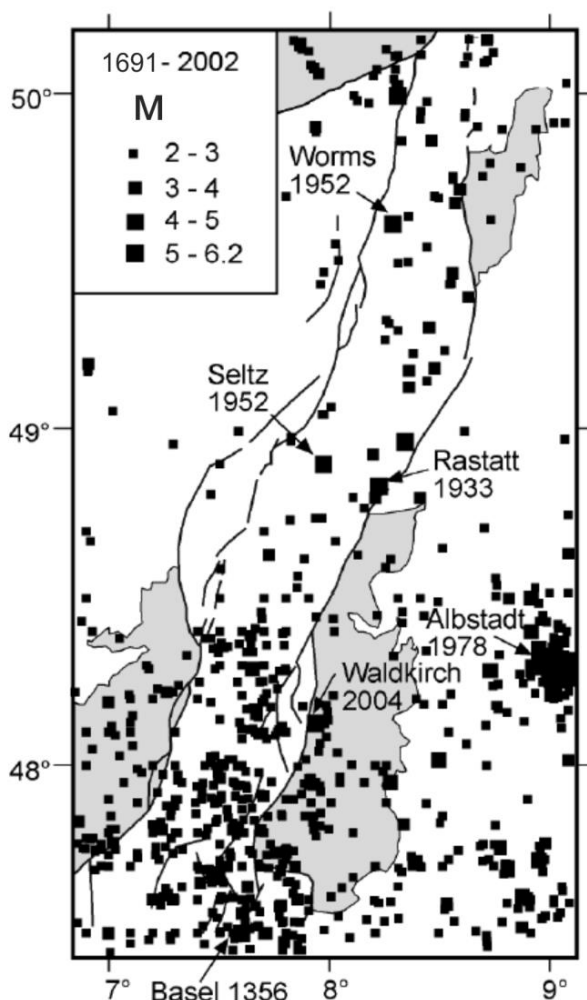


Рис. 15 Распределение сейсмических очагов в пределах Верхнерейнского грабена, а также смежных структур [по материалам Leydecker, 2005]. Стрелками указаны наиболее разрушительные землетрясения.

Анализ механизмов очагов землетрясений в пределах тектонической зоны позволяет установить кинематический тип отдельных тектонических дислокаций и всей зоны в целом. Результаты исследований свидетельствуют о том, что наибольшее количество разрывных нарушений соответствует условиям сброса. Наряду с этим, картируются разломы сдвиговой (левосторонней) кинематики. Надвиги картируются преимущественно за пределами «крыльев» грабена [Plenefisch, Bonjer, 1997]. Полученные данные свидетельствуют о том, что структура ВРГ

развивается в сложных условиях комбинации горизонтальных и вертикальных тектонических перемещений.

1.2.2 Особенности глубинного строения земной коры Верхнерейнского грабена

Результаты комплексной интерпретации геофизических и сейсмологических данных

Результаты комплексной интерпретации сейсморазведочных, гравиметрических и магнитометрических данных свидетельствуют о том, что разрывные нарушения контрастно проявляются в геофизических полях по таким параметрам, как границы изменения инфраструктуры поля, линии максимальных градиентов и смены простираения аномалии). Основываясь на сопоставлении результатов геофизических съемок и распределения очагов землетрясений, исследователи отмечают преимущественную листрическую форму разрывных нарушений. В осадочном чехле наблюдаются наклонные и близвертикальные тектонические нарушения. Эти разломы имеют преимущественно верхнекоровое заложение; лишь некоторые из них трассируются до глубин 10-12 км [Mayer и др., 1997, Haimberger и др., 2005].. Исследователями отмечается, что разрывные дислокации в некоторых случаях сочленяются на глубине и образуют отрицательные цветковые структуры, характерные для обстановок осадочных бассейнов [Rotstein, Schaming, 2011]. В ходе исследований глубинной морфологии граничных разломов устанавливается их листрическая форма с азимутами линии падения во встречных направлениях. Эти разломы маркируются очагами землетрясений и уверенно трассируются до глубин 12-15 км [Wenzel и др., 1991]. Результаты анализа сейсмических разрезов свидетельствует о том, что на этих глубинах картируется субгоризонтальный слой повышенной рефлексивности и происходит кардинальное понижение уровня сейсмичности.

Высокая степень деструкции, картируемая в пределах верхней коры ВРГ, проявляется и на глубинных горизонтах этой тектонической зоны. Эти заключения подтверждаются повышенной концентрацией субгоризонтальных и пологих отражателей в пределах нижней коры, особенно вблизи границы Мохоровичича (М). Наряду с этим, характерной особенностью глубинной морфологии ВРГ является картирование ступенеобразной границы М. Исследователи этого региона предполагают, что наблюдаемая картина может быть обусловлена развитием зоны деструкции под действием постоянных тектонических напряжений (Рисунок 16).

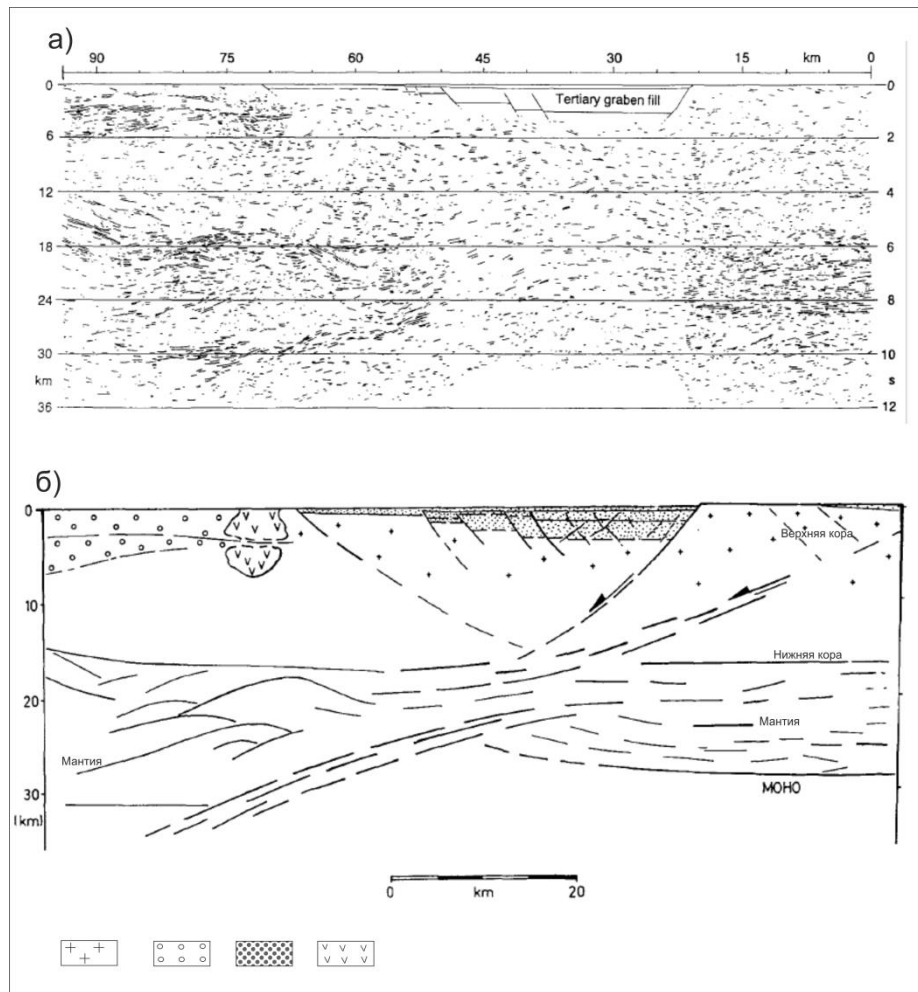


Рисунок 16 Фрагмент сейсмического разреза профиля ECORS/DEKORP-S по [Wenzel и др.,1991]: а) мигрированный сейсмический разрез, представленный в штриховом виде; б) интерпретация сейсмического разреза в форме штрихового поля по [Wenzel и др.,1991]

Существенную информацию о тектонической природе субгоризонтальных высокорекфлексивных зон приносят результаты реологического моделирования (Рисунок 17 б). Реологическая характеристика радиально расслоенного разреза континентальной земной коры (Рисунок 17 а), отражает наличие двух типов слоев, в пределах которых доминируют хрупкие и пластичные деформации.

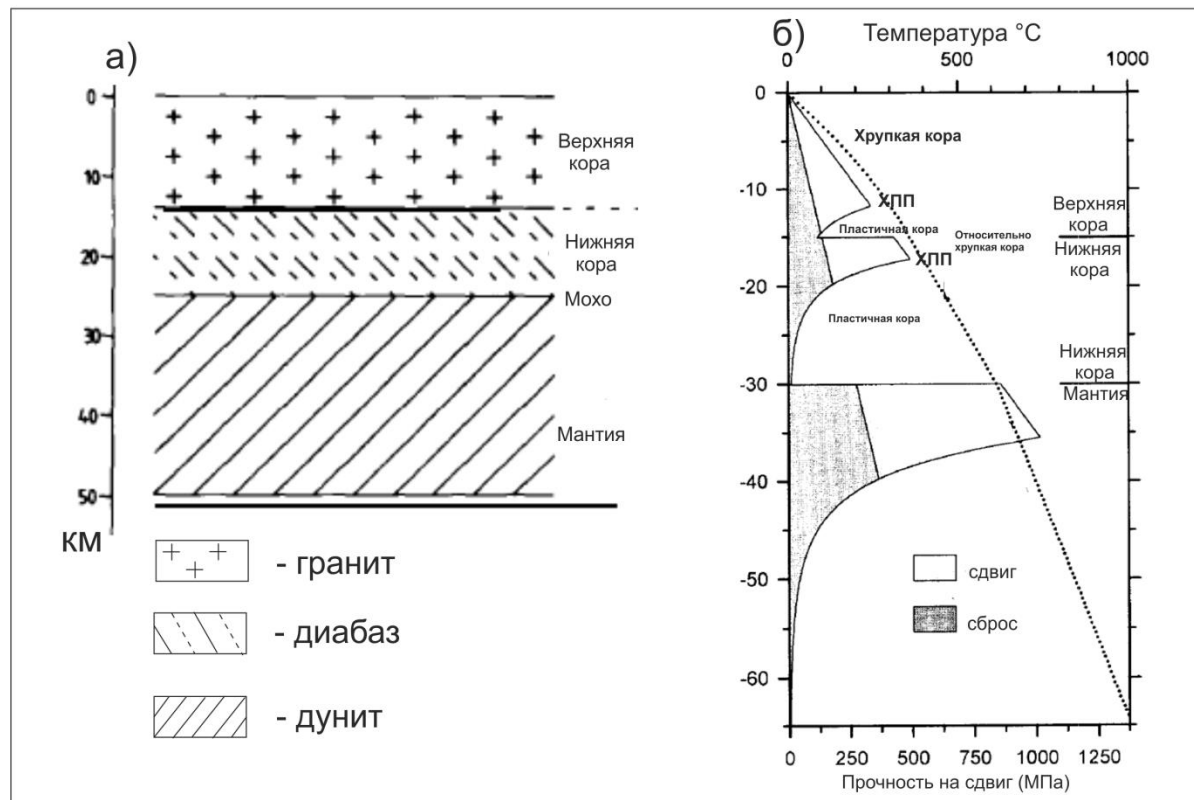


Рисунок 17 Реологическое моделирование: а) - обобщенный разрез континентальной земной коры по [Meisser_1992]; б) – кривая зависимости прочности породы от глубины залегания в земной коре центральной Европы по [Мауер и др., 1997]. Величина теплового потока 80 мВт/м²

Исследователями отмечена прямая зависимость силы трения от глубины в соответствии с законом Брайля [Byerlee, 1978] от поверхности до глубин 11-12 км. В связи с этим, установлено, что верхняя кора характеризуется «хрупкой» реологией. Ниже располагается слой хрупко-пластичного перехода (ХПП), ареал которого характеризуется относительным равенством между прочностью породы и сдвиговым напряжением. [Meissner и Tapper, 1992]. Подтверждением результатов реологического моделирования являются данные анализа глубин подавляющего количества землетрясений. В земной коре ВРГ это глубинный интервал от 12 до 15 км.

На следующих глубинных уровнях (14-18 км) моделируется «переходная» кора, в пределах которой снова прослеживается линейная зависимость между силой трения и глубиной. Следующий интервал глубин (19-22 км) характеризуется резким повышением доли вязких деформаций, о чем свидетельствует высокий градиент, характеризующий радикальное снижение показателя прочности породы (Рисунок 17 б). Исследователями отмечается, что на этих глубинах может располагаться второй слой ХПП. В подстилающей этот слой нижней коре до границы Моховичича доминируют пластичные деформации.

Результаты реологического моделирования земной коры центральной Европы отражают общую тенденцию к проявлению линейной зависимости между прочностью породы на трение и

глубиной ее залегания. Наиболее аномальные области диаграммы на рисунке 17 б), интерпретируемые как слои ХПП, моделируются вблизи границы верхней- нижней коры и на более глубоких горизонтах в пределах последней.

Для детального изучения выделенный слоев ХПП и определения их роли в глубинном строении ВРГ, автором был пересчитан временной сейсмический разрез вдоль профиля ECORS/DEKORP-S в показателе рефлексивности [Агеев и Егоров, 2017 а)]. Полученные результаты были сопоставлены с данными реологического моделирования и распределением очагов землетрясений (Рисунок 18).

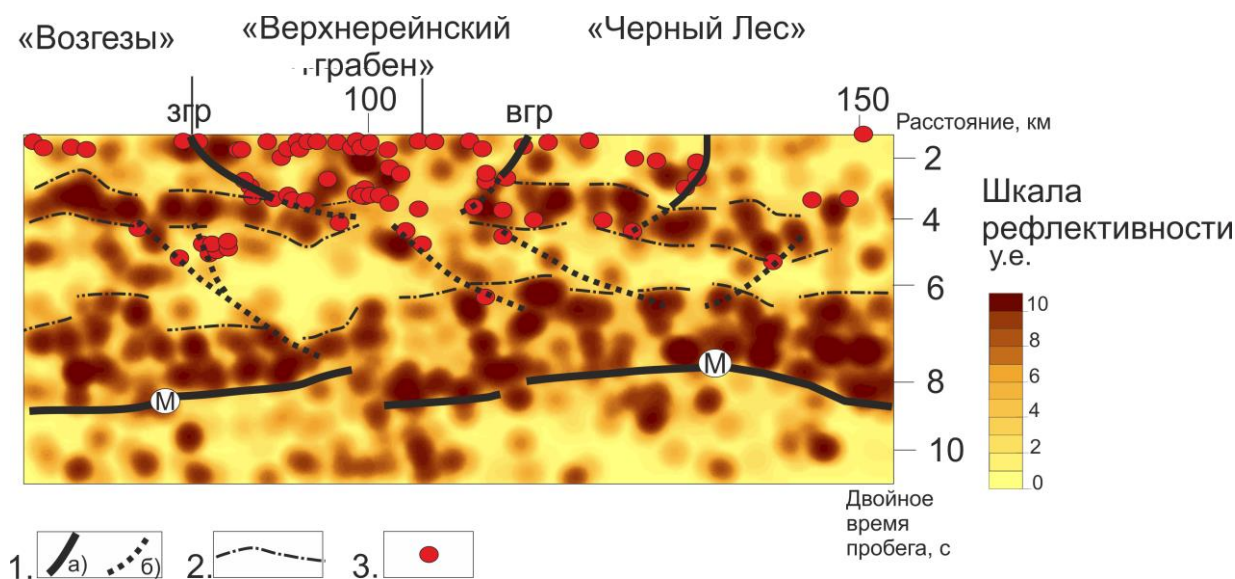


Рисунок 18 Фрагмент сейсмического разреза глубинного МОВ в показателях рефлексивности вдоль профиля ECORS/DEKORP-9S. Условные обозначения: 1 – количество отражающих площадок на единицу разреза (рефлексивность): а – высокая, б – повышенная, в – умеренная, г – низкая; 2 – разрывные нарушения: а главные, уверенно трассируемы (в том числе -згр-Западный, вгр - Восточный), б – второстепенные; 3 – субгоризонтальные границы верхней и нижней коры; 4 – землетрясения с магнитудой выше 1.5, зарегистрированные за период с 1980 по 2018 по данным американской геологической службы; М – предполагаемое положение границы Мохоровичича;

Полученные результаты подтверждают заключение о том, что в разрезе земной коры ВРГ проявляется чередование реологически хрупких и пластичных слоев. В верхней части разреза выделяется высокорефлексивная хрупкая кора. Она аккумулирует подавляющее количество очагов землетрясений и характеризуется высокой степенью латеральной неоднородности. Разрывные нарушения, которые закартированы на дневной поверхности, имеют листрическую морфологию. Во многих случаях эти дислокации трассируются цепочками очагов землетрясений

и замыкаются на субгоризонтальный слой повышенной рефлексивности (глубины - 10-14 км). В пределах последнего уровень сейсмичности заметно снижается. Совокупность вышесказанных заключений и результатов реологического моделирования позволяет сделать вывод о том, что высокорефлексивная зона, контрастно проявляющаяся на сейсмическом разрезе, маркирует положение зоны «хрупко-пластического перехода».

Залегающая гипсометрически ниже «переходная» кора проявляется на разрезе как сейсмически прозрачная область. В ее пределах картируются лишь отдельные рефлекторы и к ней приурочены единичные очаги землетрясений. Отсутствие протяженных цепочек землетрясений и высокоамплитудных отражений не позволяет проводить уверенное моделирование структурно-вещественных неоднородностей. В данной ситуации представляется возможным лишь наметить (пунктиром) трассы разломов, развивающиеся в «переходной» коре.

Высокорефлексивная нижняя кора контрастно проявляется на фоне относительно прозрачной вышележащей «переходной» коры. Характер пространственного распределения рефлексивности и отсутствие градиентов сейсмологичности не позволяют уверенно говорить о наличии здесь второго слоя ХПП, обоснованного данными реологических исследований.

Выводы

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о «многоэтажной» структуре земной коры тектонической зоны ВРГ. Первым структурным этажом является хрупкая верхняя кора, которая отделена от нижележащих горизонтов субгоризонтальной зоной деструкции (ХПП), в которой прочность пород снижается. Слой ХПП картируется на глубинах 10-15 км и проявляется на сейсмическом разрезе МОВ-ОГТ как субгоризонтальная высокорефлексивная зона. Характерной особенностью слоя ХПП является выполаживание в его пределах тектонических нарушений. Следующим структурным этажом является «переходная» кора (15-19 км), прочность которой возрастает, что подтверждается областью линейной зависимости на рисунке 17 б). Результаты комплексной интерпретации фактологического материала свидетельствуют о том, что в «переходной» коре могут развиваться хрупкие деформации, однако их доля будет значительно меньшей в сравнении с верхней корой. Здесь автором моделируются пологие структурно-вещественные неоднородности, которые могут выступать в роли связующего звена между верхней и нижней корой. Еще одним структурным этажом является высокорефлексивная нижняя кора, в пределах которой согласно результатам реологического моделирования располагается вторая субгоризонтальная зона деструкции (ХПП нижней коры), на которую, предположительно, замыкаются моделируемые листрические дислокации переходной коры. Подошвой нижней коры является граница Мохоровичича, которая картируется на глубинах около 28-30 км под ВРГ.

1.3 Байкало-Становая региональная сдвиговая зона

1.3.1. Структура земной коры по результатам комплексной интерпретации геофизических данных в сечении геотраверса «1-СБ»

Результаты комплексных исследований наиболее детально изученных региональных сдвиговых зон Мира свидетельствуют о том, что определяющую роль в формировании этих структур играют субгоризонтальные зоны деструкции земной коры, часто коррелируемые с зонами хрупко-пластичного перехода (ХПП). С данной точки зрения проведение аналогичных специализированных исследований земной коры Байкало-Становой региональной сдвиговой зоны на территории нашей страны представляет большой интерес.

Наиболее информативные материалы, освещающие глубинное строение БСЗ были получены в конце XX в. по результатам отработки геотраверсов ГСЗ Абакан-Тында-Татарский пролив и Тында-Амурзет (Центр ГЕОН). Новый импульс в изучении земной коры региона придали комплексные геолого-геофизические работы в рамках национальных программ Государственного геологического картирования и создания сети опорных геофизических профилей («1-СБ» и «3-ДВ» южный участок), выполненные под научно-методическим руководством ФГБУ «ВСЕГЕИ».

Результаты сейсморазведочных исследований

Главным информационным слоем при моделировании структурно-вещественных неоднородностей земной коры в данном сечении являются материалы сейсморазведки МОВ-ОГТ. Представление сейсмического разреза в показателях «рефлективности» позволяет наиболее уверенно оценить параметры зонально-блоковой структуры земной коры [Агеев и Егоров, 2017 б), Агеев и Егоров, 2018]. На таких разрезах отмечается высокая степень неоднородности верхней коры, которая проявляется в форме чередования субгоризонтальных ареалов сгущения рефлекторов и сейсмически прозрачных зон. Выделяются отдельные пачки наклонных рефлекторов.

Характерной особенностью земной коры БСЗ является картирование на глубинах 14-18 км фрагментарно проявленного субгоризонтального слоя повышенной рефлективности, который прослеживается на всем протяжении сейсмического разреза. Он проявляется как субгоризонтальный ареал повышенной рефлективности относительной выдержанной мощности (3-5 км). Кора, располагающаяся гипсометрически ниже подошвы этого слоя, характеризуется умеренной и пониженной рефлективностью практически до глубин 35-37 км. Здесь наблюдается мозаичная картина распределения отдельных высокорефлективных пачек, разделяемых сейсмически прозрачными зонами. Горизонты земной коры вблизи границы Мохоровичича

проявляются на сейсмическом разрезе как единый высокорекфлексивный слой. Мощность этого слоя выдержана и составляет около 7-8 км (Рисунок 19)

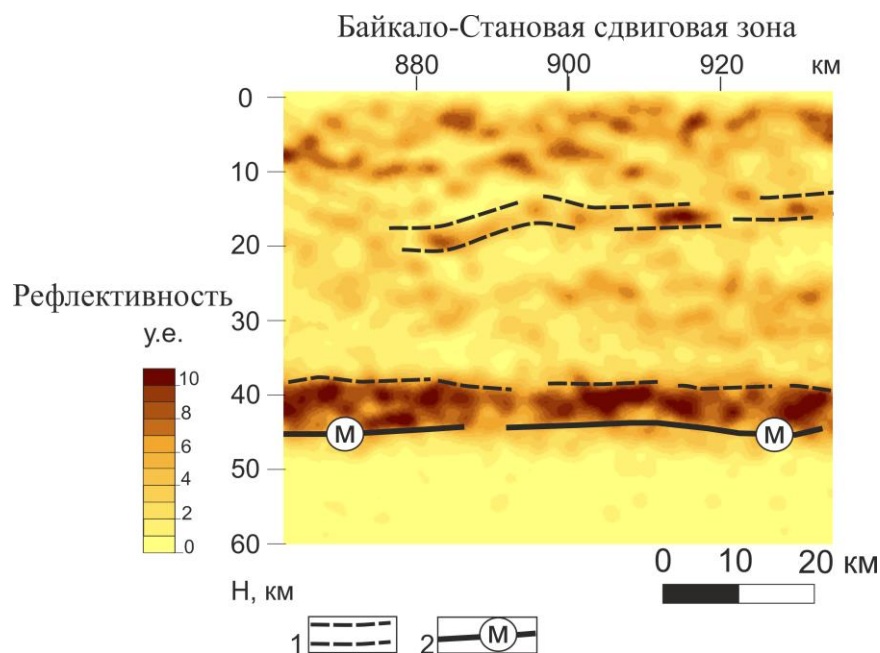


Рисунок 19 Трассирование верхнекоровых тектонических дислокаций БСЗ в сечении опорного профиля «1-СБ». Сейсмический разрез в показателях рефлективности получен с использованием материалов ЦГГФ ФГБУ «ВСЕГЕИ».

Условные обозначения: 1 – слои повышенной рефлективности. В нижней коре подошва этого слоя совпадает с границей Мохоровичича; 2 – предполагаемое положение граница Мохоровичича.

Интересные результаты были получены в ходе сопоставления скоростного разреза земной коры ГСЗ в сечении геотраверса «Тында-Амурзет - Татарский пролив» (проект БАЗАЛЬТ) и разреза глубинного МОВ-ОГТ в сечении опорного геофизического профиля «1-СБ» (Рисунок 20). К сожалению, пересечение этих профилей имеет место южнее исследуемой зоны БСЗ и на данном фрагменте возможна только качественная оценка взаимосвязи скоростных и структурных особенностей земной коры.

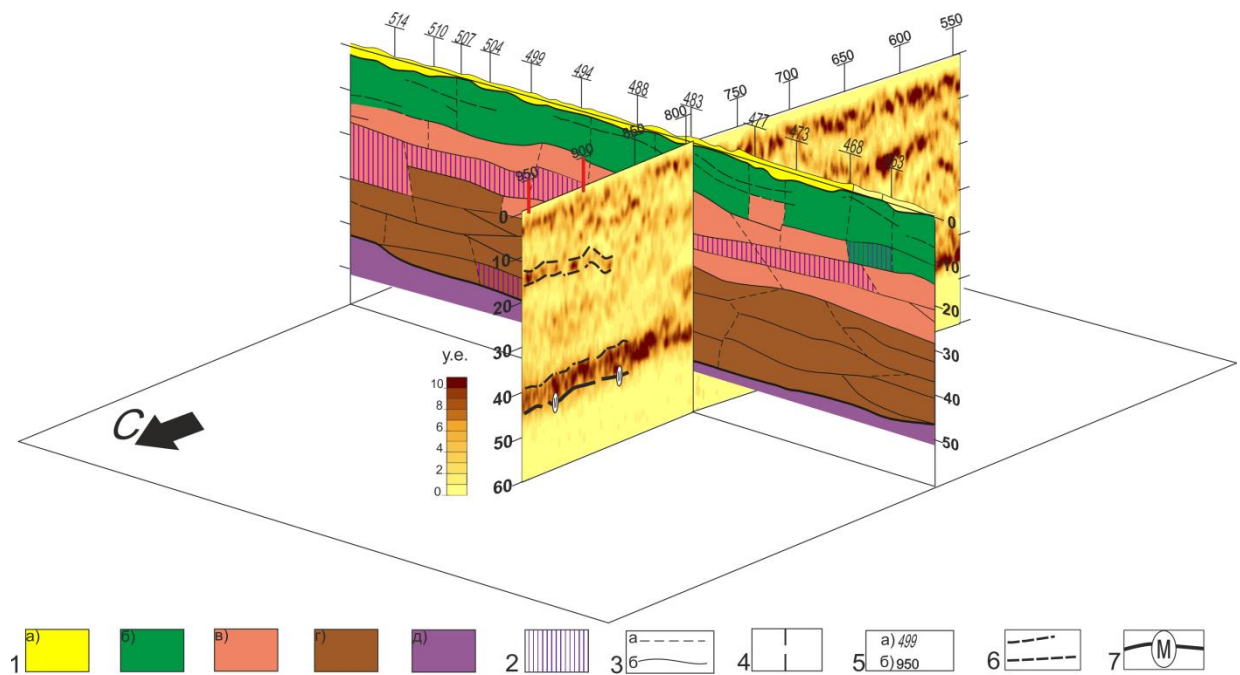


Рисунок 20 Сопоставление скоростного разреза геотраверса «Тында-Амурзет-Татарский пролив (БАЗАЛБТ)» и разреза МОВ-ОГТ «1-СБ» в показателях рефлексивности профиля (полученного с использованием данных ЦГГФ ФГБУ «ВСЕГЕИ»).

Условные обозначения: 1- скоростной разрез земной коры по данным ГСЗ с выделением: а) – осадочного чехла (скорости продольных волн (V_p)=4.0-5.5 км/с), б) – верхнекорового мегаслоя (V_p =6,0-6,45 км/с), в) – среднекорового мегаслоя (V_p = 6.45 – 6.65 км/с), г) – нижнекорового мегаслоя (V_p = 6.7 – 7.3 км/с), д) –верхней мантии (V_p = 8.2 ± 0.2 км/с); 2 – сейсмические домены, характеризующиеся инверсией скоростей (волноводы); 3 – сейсмические границы, построенные по монотипным и более, чем 2 типам волн; 4 – границы доменов с разными скоростными характеристиками; 5 – расстояние вдоль геотраверсов: а) - пункты взрыва «БАЗАЛБТ», б) – километры разреза «1-СБ»; 6 - слои повышенной рефлексивности; 7 - граница Мохоровичича.

В ходе сопоставления материалов этих базовых сейсмических методов было установлено, что в области пересечения геотраверсов на глубинах 17-18 км по данным ГСЗ картируется волновод (инверсия сейсмических скоростей). Отмечается, что положение этого аномального слоя приурочено нижней границе субгоризонтальной высокорефлексивной зоны, закартированной ранее на разрезе МОВ-ОГТ. Необходимо отметить, что вышесказанное хорошо согласуется с научно-теоретическими заключениями Егорова А.С. [Егоров, 2004], которые свидетельствуют о взаимосвязи волноводов и субгоризонтальных сейсмических границ в земной коре.

Таким образом, результаты сейсморазведочных исследований метода ГСЗ свидетельствуют о наличии в земной коре аномального слоя, характеризующегося инверсией сейсмических скоростей и располагающегося в базальной части верхней коры. Результаты сопоставления базовых методов сейсморазведочных исследований (МОВ-ОГТ и ГСЗ) позволили установить

приуроченность слоя инверсии сейсмических скоростей к подошве высокорекфлексивной субгоризонтальной зоны, которая отчетливо картируется на разрезе МОВ-ОГТ.

Результаты решения обратной задачи теории потенциала.

Существенную информацию о глубинном строении Байкало-Становой региональной сдвиговой зоны приносят результаты гравиразведочных и магниторазведочных исследований. В ходе анализа картографических основ потенциальных полей было установлено, что в сечении геотраверса «1-СБ» земная кора Байкало-Становой сдвиговой зоны характеризуется мозаичным характером магнитного поля и региональным понижением поля силы тяжести.

На глубинных моделях (Рисунок 21, Рисунок 22), рассчитанных по алгоритму томографии потенциальных полей Штокаленко М.Б (ФГУНПП "ГЕОЛОГОРАЗВЕДКА") [Алексеев С.Г. и др., 2010] отчетливо отображается высоконеоднородная верхняя кора, в пределах которой наблюдается значительное количество локальных неоднородностей. Распределение абсолютных плотностей здесь варьирует в интервале от 2.6 до 2.8 г/см³, а эффективной намагниченности от 2 до -2 мА/м. Нижняя кора отчетливо выделяется по смене инфраструктуры разреза: локальные градиентные зоны сменяются более генерализированными ареалами повышенных и пониженных значений на рассчитанных моделях.

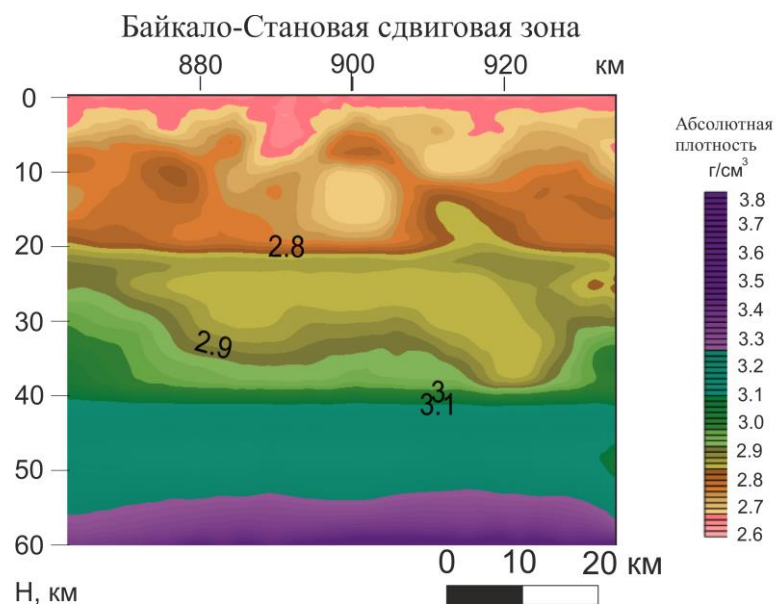


Рисунок 21 Модель распределения абсолютных плотностей в земной коре Байкало-Становой сдвиговой зоны в сечении геотраверса «1-СБ»

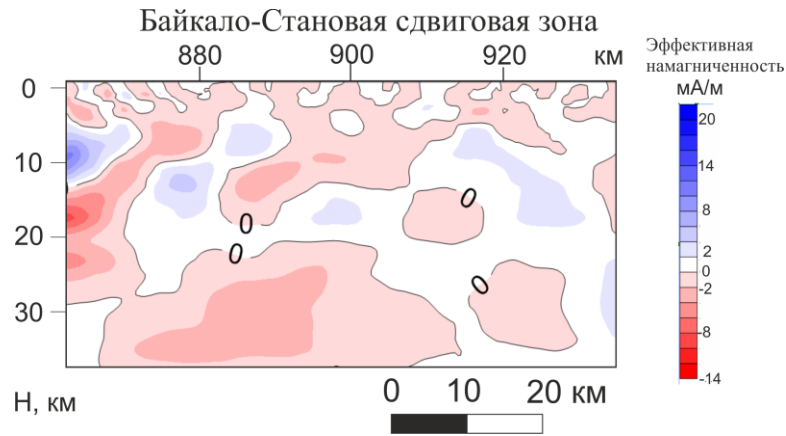


Рисунок 22 Модель распределения эффективной намагниченности в земной коре Байкало-Становой сдвиговой зоны в сечении геотраверса «1-СБ»

Результаты сейсмологических исследований.

Учитывая мировой опыт использования данных сейсмологии при изучении глубинного строения зон Сан-Андрес и Рейнского грабена в ходе авторских исследований были собраны и систематизированы данные о пространственном расположении очагов землетрясений в полосе геотраверса (Рисунок 23). Методология процедур проецирования очагов на разрез наиболее полно отражена в Главе 2. При проведении операций проецирования использовались каталоги Геофизической службы РАН, г. Обнинск, американской геологической службы (USGS). В выборку включались очаги, расположенные не дальше 10 км от трассы профиля.

Байкало-Становая сдвиговая зона

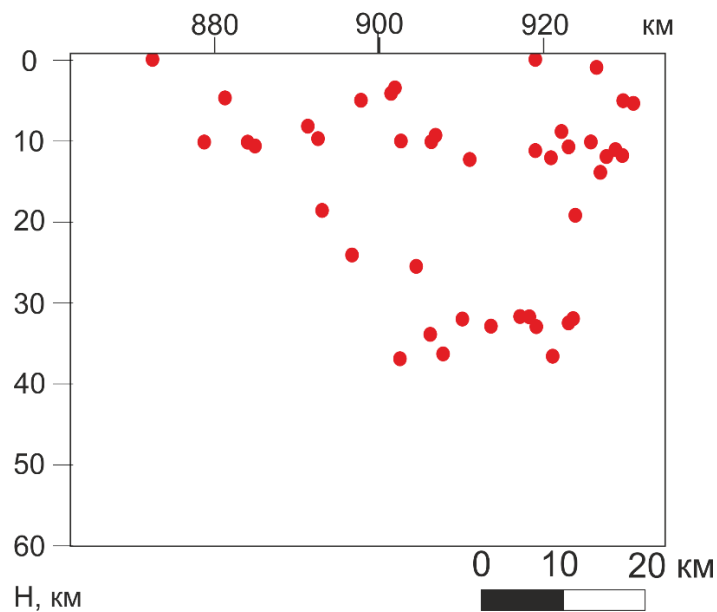


Рисунок 23 Распределение очагов землетрясений по глубине в полосовой зоне геотраверса «1-СБ» в области пересечения с БСЗ. Максимальные удаления 10 км.

Анализ распределения очагов землетрясений в земной коре свидетельствует о наличии подавляющего количества землетрясений на интервале глубин 0-16 км. Горизонты средней-нижней коры характеризуются значительным понижением уровня сейсмичности. Нижней границей сейсмогенной коры можно считать глубины 35-37 км, ниже которых сейсмичность полностью отсутствует.

Результаты реологического моделирования

Опыт ранее проведенных исследований свидетельствует о том, что чрезвычайно важную информацию об особенностях глубинного строения земной коры несут данные реологического моделирования. Необходимо отметить, что подобные специализированные исследования проводились при комплексных исследованиях тектонических зон Сан Андреас и Верхнерейнского грабена. Относительно зоны развития Байкало-Становой геоструктуры исследование прочностно-вязкостной зависимости в породах не проводилось. В связи с этим автором были проанализированы обобщающие работы, освещающие результаты подобных исследований для континентальной литосферы. Основными критериями отбора являлись сопоставимые величины теплового потока, фиксируемых на дневной поверхности. Для земной коры Байкало-Становой сдвиговой зоны эти значения составляют в среднем 50-60 мВт/м², за исключением самой Байкальской рифтовой впадины, для которой они возрастают до 200 мВт/м² [Дучков и Соколова, 1999]. Наиболее информативные результаты были получены в работах [Kohlsted и др., 1995, Cloetingh и Burov, 1996 и др.]. Объектом моделирования в них выступал кварц - основной породообразующий минерал континентальной коры. Начальные условия моделирования предполагают наличие постоянной скорости деформации (ϵ) равной 10^{-15} с⁻¹, величины теплового потока 45, 60 мВт/м² и присутствия высокого порового давления, характерного для разломных зон (Рисунок 24). Исследователями отмечается, что полученные модели отражают общую тенденцию зависимости прочности от глубины залегания породы при фиксируемых величинах теплового потока. В данном случае эти модели и могут быть применены в качестве первого приближения при анализе реологических свойств континентальной литосферы. Отмечается, что вариации отдельных параметров, влияющих на глубины расположения областей хрупко-пластичного перехода, могут быть учтены только при детальных специализированных исследованиях.

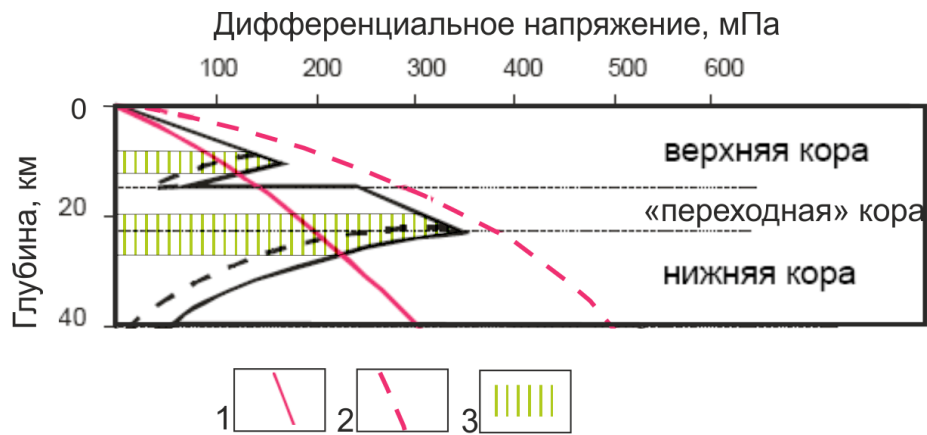


Рисунок. 24 Модель прочности континентальной литосферы при разных тепловых режимах [Cloetingh и Burov, 1996].

Условные обозначения: 1 – тепловой поток равный 45 мВт/м^2 ; 2 – тепловой поток равный 60 мВт/м^2 ; 3 - область хрупко-пластичного перехода

Результаты анализа полученных моделей свидетельствуют о том, что в земной коре исследуемого региона выделяются области, соответствующие максимумам прочности – линейные зависимости на диаграмме. Деформации в них соответствуют закону Брайля и, следовательно, полагается, что земная кора в пределах этих областей отвечает хрупкой реологии. Изменение типа деформаций происходит в слоях хрупко-пластичного перехода (значительное снижение прочностных характеристик породы). На приведенной модели наблюдается две таких зоны (глубины 9-15 км и 20-28 км). Как было показано при исследованиях глубинного строения тектонических зон ВРГ и Сан Андреас для этих глубинных горизонтов соблюдается условие равенства между силой трения и сдвиговыми напряжениями. Залегающие глубже выделенных слоев ХПП породы проявляют нелинейно-вязкие свойства – наличие упруго-пластичных или упруго-вязких деформаций. Наиболее значительное понижение прочности вещества моделируется вблизи границы Мохоровичича (35-40 км).

1.3.2. Результаты комплексной интерпретации геолого-геофизических данных в полосовой зоне геотраверса «1-СБ»

Моделирование структурно-вещественных неоднородностей в вертикальном измерении основывалось на их строгой пространственной привязке, на дневной поверхности. Принципы и методика моделирования подробно описывается в Главе 2 данной работы.

Результаты комплексной интерпретации геофизических, сейсмологических данных и результатов реологического моделирования свидетельствуют о том, что наибольшее количество структурно-вещественных неоднородностей локализуется в верхней коре БСЗ (Рисунок 25).

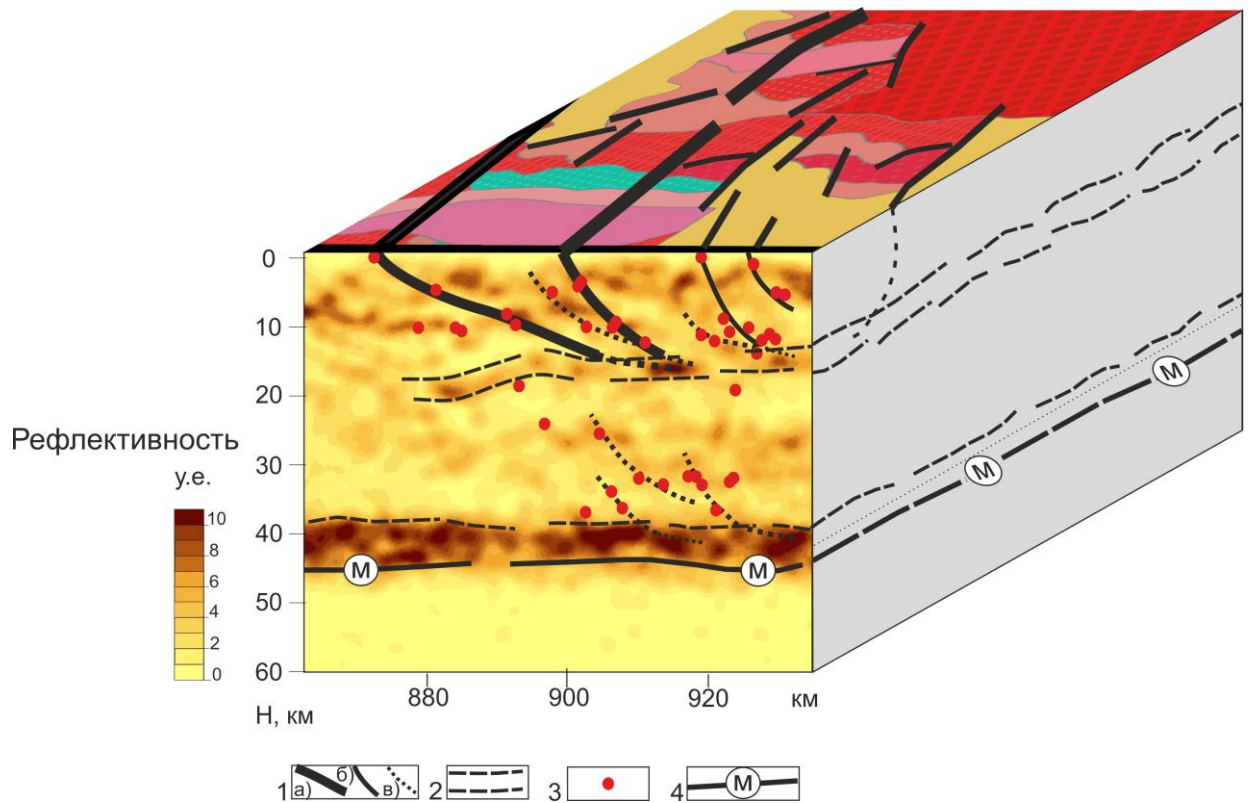


Рисунок 25 Трассирование верхнекоровых тектонических дислокаций БСЗ в сечении геотраверса «1-СБ». Сейсмический разрез в показателях рефлексивности получен с использованием материалов ЦГГФ ФГБУ «ВСЕГЕИ»

Условные обозначения: 1 – тектонические нарушения: а –главные разломы, б – второстепенные, в – предполагаемые; 2 – субгоризонтальные высокорефлективные слои; 3 – очаги землетрясений; 4 – предполагаемое положение граница Мохоровичича

Верхнекоровые дислокации уверенно маркируются по взаимному расположению рефлекторов и линейных цепочек очагов сейсмичности. Устанавливается их листрический характер с увеличением угла падения с глубиной. Уверенная трассировка тектонических нарушений возможна до глубин 12-18 км. На этом глубинном уровне значительно снижается уровень сейсмичности и наблюдаются смена наклонных рефлекторов на субгоризонтальные

пачки, образующие единый слой. В связи с вышесказанным предполагается выколачивание верхнекоровых разрывных нарушений в пределах выделенного субгоризонтального рефлективного слоя.

Глубины расположения субгоризонтальных высокорективных пачек и нижней границы подавляющего количества очагов сейсмичности коррелируют с расположением слоя хрупко-пластичного перехода, установленного по результатам реологического моделирования, что позволяет интерпретировать выделенный на сейсмическом разрезе высокорективный слой в базальной части верхней коры как область хрупко-пластичного перехода (ХПП).

Земная кора, расположенная гипсометрически ниже слоя ХПП характеризуется сейсмической прозрачностью и значительно меньшим количеством землетрясений. Присутствие сейсмичности на горизонтах средней-нижней коры (22-35 км) позволяет предположить наличие некоторой доли хрупких деформаций. Результаты анализа пространственного сопоставления очагов землетрясений и распределения рефлективных пачек позволяют наметить отдельные структурно-вещественные неоднородности литрической морфологии. Выделенные разрывные нарушения могут рассматриваться как наличие глубинного канала сдвиговой зоны.

Необходимо отметить, что результаты реологического моделирования свидетельствуют о упруго-вязкой реологии земной коры на этих глубинных горизонтах. Противоречие результатов моделирования и наблюдаемой картины способствовало проведению серьезной аналитической работы со специализированной литературой. В некоторых публикациях приводятся научно-теоретические заключения свидетельствующие о том, что наблюдаемая сейсмическая активность глубинных горизонтов может быть связана со следующими факторами: присутствием в коре минералов с низкой температурой активации крипового течения (деформации ползучести) [Stephenson и Cloetingh, 1991]; различие композиционного состава горных пород [Sibson, 1982]; не хрупким механизмом релаксации напряжений, который может быть связан с фазовыми изменениями или переориентацией кристаллической решетки [Kirby, 1991]. Верификации вышесказанных заключений необходимо проведение специализированных лабораторных работ и экспериментов.

Подшовой сейсмогенной земной коры в сечении геотраверса «1-СБ» является кровля высокорективного субгоризонтального слоя, картируемого на глубинах 38-45 км. Кардинальное снижение количества землетрясений в пределах нижнекорового высокорективного слоя, по аналогии с верхней корой, не позволяет провести дальнейшее трассирование разрывных нарушений. Таким образом, предполагается выколачивание последних в пределах выделенного субгоризонтального слоя.

Выводы

Таким образом, мировой опыт исследования глубинного строения региональных сдвиговых зон, и научно-теоретические заключения, сделанные в ходе аналогичных авторских исследований, свидетельствуют о том, что земная кора Байкало-Становой региональной сдвиговой зоны характеризуется многослойностью. Результаты комплексной интерпретации геофизических данных отражают наличие хрупкой верхней коры, в пределах которой обширно развиваются тектонические нарушения, преимущественно листрического характера. Следующим структурным этажом, играющим принципиальную структурно-формирующую роль, является слой хрупко-пластичного перехода. Эта область контрастно отображается на сейморазведочных данных как субгоризонтальная зона повышенной рефлексивности в низах верхней коры. Слой развивается на глубине 12-20 км и имеет мощность 3-5 км. Характерной его особенностью является замыкание в его пределах листрических дислокаций, закартированных на поверхности. В нижней коре выделяется область хрупких деформаций, имеющих листрический характер. Эти структурно-вещественные неоднородности интерпретируются как наличие глубинного канала сдвиговой зоны. Они замыкаются на высокорефлексивный субгоризонтальный слой вблизи границы М.

Глава 2. Методическая схема комплексной интерпретации геолого-геофизических данных

2.1 Структура методической схемы

В ходе исследования глубинного строения земной коры Байкало-Становой сдвиговой зоны, автором была разработана специализированная методическая схема комплексной интерпретации разнотипных геолого-геофизических данных. Особенностью этой схемы является упорядоченность приемов сбора, обработки и интерпретации фактологического материала. Вся последовательность работы с данными подразделяется на три стадии. Основной задачей каждой из них является подготовка и систематизация информации для проведения дальнейших операций, ориентированных на выделение особенностей глубинного строения земной коры сдвиговой зоны. На первой стадии параллельно с формированием рабочего банка геолого-геофизической информации выполняется анализ мирового опыта изучения глубинного строения наиболее известных сдвиговых зон Мира. В настоящем исследовании в качестве эталонных выбраны Верхнерейнский грабен и зона Сан Андреас. Наиболее сложным и трудоемким процессом является латеральное моделирование разрывных нарушений Байкало-Становой сдвиговой зоны на дневной поверхности. Эти процедуры освещаются на второй стадии разработанной методической схемы. Заключительная стадия работ ориентирована на моделирование структурно-вещественных неоднородностей земной коры в вертикальном измерении и качественной оценке параметров глубинной морфологии сдвиговой зоны (Рисунок 26).



Рисунок 26 Технологическая схема, отражающая последовательность стадий комплексных исследований глубинного строения БСЗ

2.2 Формирование банка геолого-геофизических данных

На начальной стадии исследования глубинного строения региона является сбор максимально возможного количества геолого-геофизической информации об объекте исследования. В формируемые рабочие банки данных входят данные как региональных геологических, геофизических и дистанционных исследований, так и результаты более детальных работ. Следует отметить, что все материалы группируются по направленности на выделение закономерностей пространственного распределения структурно-вещественных неоднородностей в латеральном и вертикальном измерениях.

Для моделирования латерального распределения тектонических нарушений проводится картографический анализ и промежуточная обработка и интерпретация разнотипных картографических основ (геологические карты масштаба 1:1 000 000, тектонические и неотектонические схемы, карты потенциальных полей масштабов 1:1 000 000 и 1:200 000, дистанционные основы Landsat, карта теплового потока масштаба 1:5 000 000, данные распределения очагов землетрясений и др.).

Геофизические разрезы и модели земной коры (сейсмический разрез МОВ-ОГТ в показателях рефлексивности, псевдоплотностная модель, модель распределения намагниченных источников в земной коре, геоэлектрические разрезы, распределение очагов землетрясений по глубине, реологические диаграммы и др.) в каждом случае отражают определенные физические параметры земной коры в разрезе. Эти данные направлены на моделирование разрывных нарушений в вертикальном измерении.

Большие объемы вовлекаемых в работу материалов подразумевают многообразие масштабов и условных обозначений. В связи с этим, важным этапом, предшествующим интерпретации, является проведение операций унификации и визуализации в сопоставимой образно-знаковой форме всего набора данных. Подготовка материала к дальнейшей работе проводилась, как автоматизировано с помощью пакетов географических информационных систем (ГИС) (ArcGIS, QGIS и др.), так и вручную с использованием традиционных визуальных способов картографирования (масштабирование, картографический линеаментный анализ, сопоставление и т.п.). Использование различных графических редакторов, таких как программа Corel Draw и ее аналоги значительно упрощает данную работу.

Важнейшим источником информации являлись результаты неотектонических исследований, обобщенные в форме карты активных разломов территории России под руководством В.Г. Трофимова ; геодинамические карты, схемы и разрезы глубинного строения, составленные в разные годы под редакцией В.Е. Хаина, А.С. Егорова, С.Л. Костюченко, Ю.Г. Леонова, Л.П. Зонешайна и др. Следует выделить тектоническую карту Северной, Центральной

и Восточной Азии масштаба 1:2 500 000, выполненную международной группой ученых из России (Петров О.В., Шокльский С.П. и др.), Китая (Ли Тингдонг), Монголии (О. Томуртог), Казахстана (С.З. Даукеев), Республики Кореи (Ким Бок Чул). Следует отметить высокую информативность геофизических съемок, выполненных вдоль опорных профилей «З-ДВ» (южный участок) и «1-СБ» ФГБУ «ВСЕГЕИ», АО СНИИГиМС и ОП «Спецгеофизика», ООО «Северо-Запад» (А.С. Сальников, Н.Г. Заможня, А.Г. Яковлев, Е.Д. Мильштейн, Т.В. Кашубина, П.А. Лебедкин и др.).

Большое познавательное значение имели опубликованные данные о строении, составе и проявлении в геофизических и дистанционных полях, наиболее полно изученных региональных сдвиговых зон Мира – зоны Сан Андреас, Верхнерейнского грабена и Альпийского разлома [Barka, 1988, Barka и Kadinsky-Cade, 1996, Barka и др. 2002, Fuis и др., 2007, Mooney и др., 2007 и др.]. Сопоставление установленных параметров глубинного строения с особенностями геолого-геофизического проявления глубинной морфологии БСЗ оказалось очень продуктивным.

Принципиально новую информацию о глубинном строении земной коры дают материалы реологического моделирования. Основополагающие работы в данном направлении были выполнены при исследованиях зоны Сан Андреас и Верхнерейнского грабена [Dragoni и Pondrelli, 1991, Dragoni, 1993, Meissner и Tanner, 1992, Burgmann и Dresen, 2008 и др.]. Эти исследования легли в основу научно-теоретических заключений о развитии в разрезе земной коре областей хрупких и пластичных деформаций, разделенных субгоризонтальными слоями хрупко-пластичного перехода. Результаты моделирования позволили выработать новый подход к изучению глубинного строения земной коры БСЗ.

Исследования Сан-Андреас показали его тесную пространственно-генетическую взаимосвязь со смежными региональными сдвиговыми зонами Уолкер Лэйн и Восточно-Калифорнийской сдвиговой зоны. Аналогичная взаимосвязь отмечена автором и в отношении БСЗ с Монголо-Охотской шовной зоной. Последняя интерпретируется исследователями как региональный левосторонний сдвиг. Поэтому авторские опорные геолого-геофизические разрезы заложены вкрест простирания БСЗ в южном направлении до пересечения с Монголо-Охотским швом.

Количественные и качественные показатели собранного фактологического материала в дальнейшем определяют достоверность выдвигаемых научно-теоретических заключений и степень детализации комплексных схем и моделей. Итогом первой стадии работ являются подготовленные для последующего анализа массивы цифровых и аналоговых данных. Дальнейшие операции с фактологическим материалом сохраняют строгую упорядоченность в проведении операции обработки и интерпретации данных.

2.3 Моделирование латерального распределения структурно-вещественных неоднородностей земной коры

Узловыми операциями при моделировании структурно-вещественных неоднородностей земной коры в латеральном измерении являются способы качественной интерпретации потенциальных геофизических полей, космоснимков и топографических основ. В ходе исследований в качестве фактологических основ выступали следующие материалы: карты потенциальных полей м 1: 1 000 000 серии ГК-1000/3, изданные картографической фабрикой ФГБУ «ВСЕГЕИ»; космические снимки Landsat 7, предоставленные центром Дистанционных методов природоресурсных исследований ФГБУ «ВСЕГЕИ», распределение эпицентров землетрясений (каталоги американской геологической службы, каталоги геофизической службы РАН г. Обнинск).

Способы обработки гравитационного и магнитного полей. Опыт изучения глубинного строения наиболее известных региональных сдвиговых зон мира показал их зонально-блоковое строение. Основными структурно-вещественными подразделениями в их пределах являются региональные и локальные блоки земной коры, взаимное перемещение которых происходит вдоль сдвиговых межблоковых границ. Таким образом, основными требованиями к выбору оптимальной технологической схемы качественной интерпретации цифровых массивов гравитационного и магнитного полей является их информативность в решении следующих задач: моделирование зонально-блокового строения исследуемой территории; возможность представления результатов обработки в подходящей образно-знаковой форме; технологичность способа, возможность его включения в единый цикл обработки.

На этом этапе использовались традиционные способы расчета трансформант гравитационного и магнитного полей (аналитическое продолжение поля в верхнее полупространство, расчет градиентов, выделение разночастотных составляющих поля и др.). Все перечисленные операции реализовывались с использованием стандартных алгоритмов, реализованных в программных пакетах GeoSoft Oasis Montaj v4.2 и Surfer v. 11-13 компании Golden Software. Эффективность применения данных операций была подтверждена опытным путем в пределах площади листов миллионного масштаба государственной геологической карты О-51 и N-51.

Выполненные работы показали, что при юго-западном расположении искусственного источника света на полутоновой визуализации гравитационного поля наиболее контрастно проявляются субширотные дислокации (Рисунок 27 а-б). Аналогичные преобразования магнитного поля позволили добиться удовлетворительных результатов только в случае северного расположения искусственного источника света. На этой картографической основе

наиболее отчетливо проявляются зоны разрывных дислокаций северо-западного простирания, которые показывают пространственную связь БСЗ и Монголо-Охотской шовной зоны.

Вычисления горизонтальных градиентов гравитационного и магнитного полей позволили наиболее полно выделить системы структурно-вещественных неоднородностей и определить ареалы их концентрации (Рисунок 27 в-г). Структуры Монголо-Охотской шовной зоны отчетливо проявляются в виде дугообразных линеаментов на трансформантах обоих потенциальных полей. Уверенное трассирование разрывных дислокаций БСЗ было проведено по характерным линейным и кулисообразным аномалиям субширотного простирания.

Пространственное сочленение двух региональных сдвиговых зон наиболее контрастно проявляется на трансформации полного градиента (Рисунок 27 д-е). Уверенно выделяются разрывные структуры, сочленяющиеся с осью БСЗ под острым углом. Анализ их пространственного распределения позволяет наметить границы и оценить характер перемещений локальных блоков земной коры.

В ходе комплексного анализа всего материала было установлено, что проявление структурно-вещественных неоднородностей региональных сдвиговых зон на трансформантах гравитационного поля более контрастнее в сравнении с аналогичными результатами по магнитному полю. Одной из причин этого явления, возможно, являются системные ошибки стыковки результатов аэромагнитных съемок на данной территории. В пользу такого заключения выступают отмеченные на исходной матрице магнитного поля концентрические и овалообразные аномалии схожей юго-восточной и северо-западной ориентаций.

Полученные в результате операций промежуточной обработки цифровые массивы были подготовлены для дальнейшей работы. Процедуры подготовки этих данных включали пространственную увязку картографического материала и, в необходимых случаях, масштабирование.

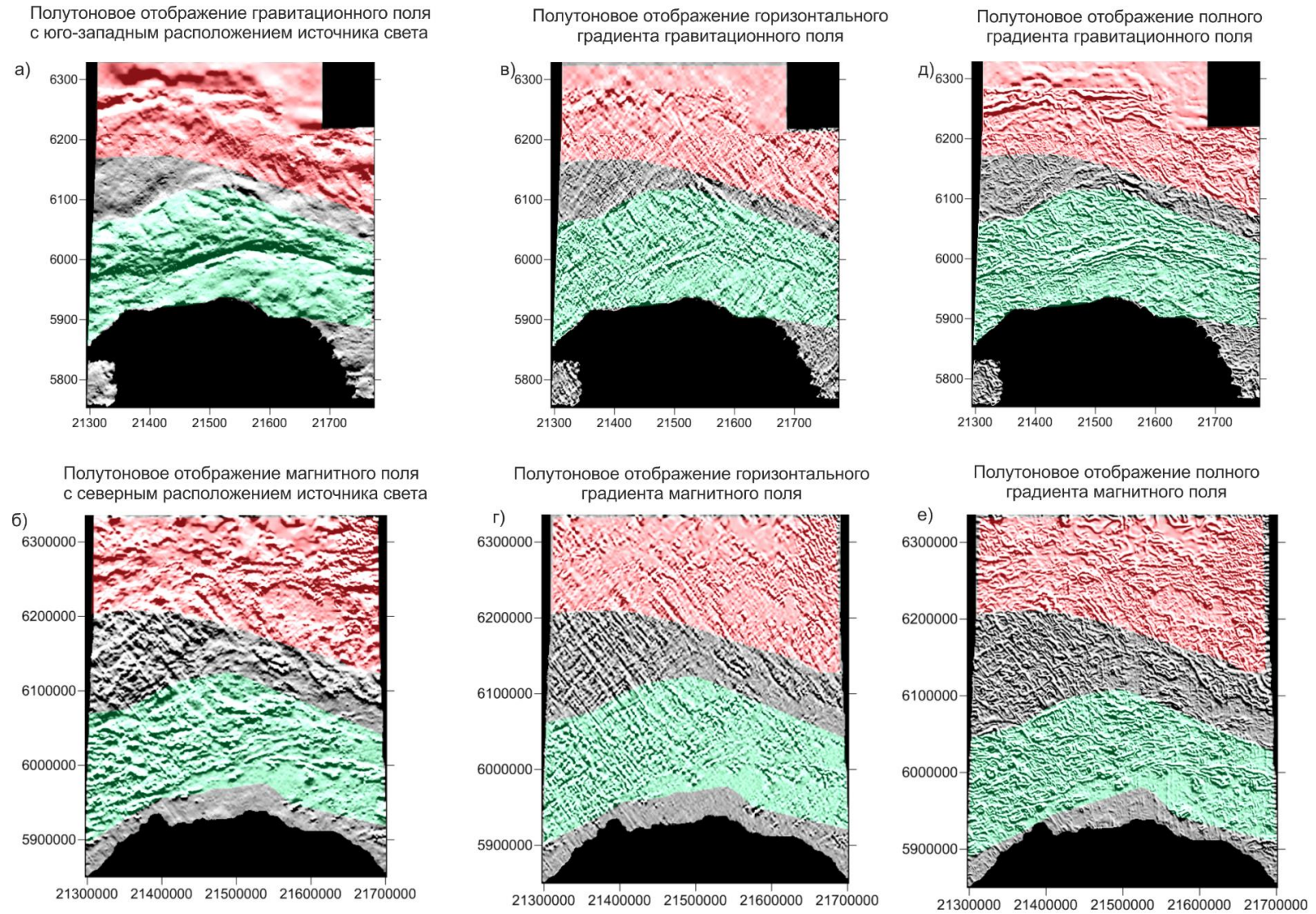


Рисунок 27 Характер проявления тектонических дислокаций БСЗ (выделена красным тоном) и Монголо-Охотской шовной зоны (выделена зелёным тоном) на трансформациях гравитационного и магнитного полей

Дешифрирование космических снимков и линеаментный анализ трансформант потенциальных полей. Процедуры дешифрирования космических снимков (КС) и линеаментный анализ потенциальных полей весьма близки между собой по получаемым результатам и принципам работы. В том и другом случаях важнейшим интерпретационным элементом является линеамент - спрямленные системно-упорядоченные элементы КС и полей, отвечающие особенностям рельефа земной поверхности и физически неоднородностям глубинных недр - элементам пликтивных дислокаций (складки и поднятия), зонам разрывных нарушений, зонам повышенной трещиноватости и т.п.) [Hobbs, 1904, Кузьмин, 2016]. Итоговые линеаментные схемы опосредованно характеризуют разрывную и блоковую тектонику региона исследований [Егоров, 2004]. Необходимо отметить, что в условиях больших площадей РСЗ интерпретатору приходится иметь дело с громадным количеством разнообразных линеаментов. Значительно редуцировать количество последних помогает операция ранжирования, основная задача которой направлена на группирование линеаментов по определенным признакам (длина, контрастность проявления). В таком случае интерпретатор может параллельно работать с несколькими слоями линеаментов без уменьшения информативности проводимой работы.

В качестве дистанционной основы был принят интегральный (компоновка нескольких отдельных снимков) снимок Landsat 7, который покрывает всю исследуемую территорию (от западной оконечности оз. Байкал до побережья Охотского моря). Разрешение одного пикселя снимка равно площади 150 м^2 дневной поверхности. Снимок включает набор из трех каналов (коротковолновый инфракрасный, канал 7; ближний инфра-красный, канал 4; видимый зеленый, канал 2).

Особенность многоканальных снимков заключается в том, что зная особенности волновых характеристик каналов и их комбинаций, можно получить интересующую исследователя информацию о свойствах различных объектов. Используемая комбинация каналов дает изображение близкое к естественным цветам, и в тоже время позволяет детально отобразить рельеф и сложную тектоническую обстановку региона исследований. Наряду с этим, в ходе исследований использовались интегральные снимки Landsat 7 по миллионным листам государственной геологической карты, предоставленные центром дистанционных методов природоресурсных исследований ФГБУ «ВСЕГЕИ». Здесь вариативность данных была более высокой и наряду с комбинацией 7, 4 и 2 каналов использовались снимки, отражающие морфо-структурные особенности территории и цифровая модель рельефа.

В ходе дешифрирования космоснимков автором применялось два способа выделения линеаментов: пользовательский (визуальный) и автоматизированный. Дешифрирование космоснимков в визуальном режиме преимущественно проводилось по линейным особенностям природного ландшафта (элементы гидрографической сети, особенности рельефа). Визуальный линеаментный анализ потенциальных полей и их трансформант в первую очередь был ориентирован на выделение характерных особенностей полей (градиентные зоны, изменение простираания аномалий и др.). Следует отметить, что основные преимущества визуального варианта проведения интерпретации заключаются в возможности интерактивного картографического анализа и параллельного сопоставления интерпретируемого материала с другими картографическими основами (геологической, неотектонической).

На ряде спорных участков и в полосовых зонах опорных профилей 1-СБ-Восточный и 3-ДВ (южный участок) привлекались результаты автоматизированного линеаментного анализа, реализованного по алгоритму Tilt [Ugur, 2011] и процедуры LINE программы PCI Geomatica (алгоритм подробно описан на официальном сайте разработчика: URL: <http://www.pcigeomatics.com/>). Основные преимущества автоматизированных способов линеаментного анализа заключаются в их доступности и оперативности. Следует отметить, что, наряду с положительными качествами автоматизированного способа, у него имеется ряд недостатков, которые связаны с невозможностью одновременного сопоставления интерпретируемого материала с другими данными и отсутствием ранжированности линеаментов (Рисунок 28, Рисунок 29). С учетом вышеприведенных заключений, результаты автоматизированного линеаментного анализа в ходе исследований использовались в качестве дополнительного источника информации.

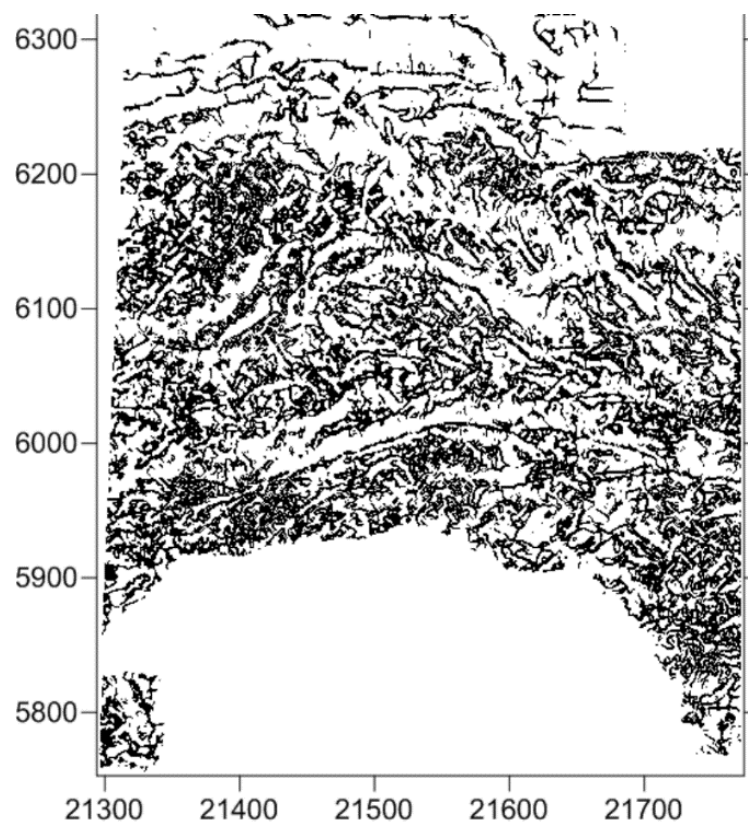


Рисунок 28 Результат работы автоматизированного алгоритма линеаментного анализа метода Tilt [Ugur A, 2011]



Рисунок 29 Результат работы автоматизированного алгоритма линеаментного анализа процедуры LINE [PCI Geomatica, URL: <http://www.pcigeomatics.com>]

Главными результатами этих процедур являются линеаментные схемы, отражающие пространственное положение ареалов концентрации структурно-вещественных неоднородностей земной коры.

Интерпретация геотермических данных. Дополнительную информацию о глубинном строении земной коры исследуемого региона несут в себе карты распределения теплового потока и результаты глубинного геотермического моделирования. В рамках проводимых исследований за основу взята карта распределения теплового потока «Атласа геофизических карт России» под редакцией Кирсанова А.А. и Литвиновой Т.П. ФГБУ «ВСЕГЕИ» [Кирсанов и др., 2006]. Многолетний опыт проведения геотермических исследований показал, что региональные изменения теплового потока связаны с особенностями глубинного строения земной коры. Контрастное проявление отдельных геоструктур на карте теплового потока обуславливается активными современными тектоническими процессами (рифтогенез, субдукция и др.) [Егоров, 2004]. Характерным примером подобных процессов служит Байкальская рифтовая зона, в пределах которой фиксируются значения теплового потока до 200 мВт/м².

Этап промежуточной обработки и методной интерпретации фактологического материала завершается составлением геолого-геофизических интерпретационных схем, отражающих пространственное распределение основных интерпретируемых объектов (блоков и межблоковых зон).

Верификация линеаментных схем на картографических основах (отбраковка). Процедуры комплексной интерпретации фактологического материала сводится к установлению геологической природы структурно-вещественных неоднородностей земной коры, выделенных геофизическими и дистанционными методами. Основополагающим звеном на этом этапе является проведение операций по верификации линеаментных схем и визуального картографического анализа, полученных в результате монометодной интерпретации данных (космоснимки, трансформанты потенциальных полей). Сопоставление полученных линеаментных схем с другими информационными слоями (геологическая основа, карта активных разломов, геодинамическая карта, схема распределения очагов землетрясений, карта теплового потока и др.) происходит в интерактивном режиме. Для проведения этих операций взаимоувязанные картографические основы в сопоставимой образно-знаковой форме визуализируются на экране монитора.

Сопоставление линеаментных схем между собой является первым элементом в цепочке комплексной интерпретации материала. На данном этапе с помощью традиционных процедур картографического анализа отбраковываются структурно-вещественные единицы, пространственное расположение которых подтверждается только одним методом интерпретации

и/или кардинально отличается от общей картины распределения линеаментов. Линеаменты, форма и ориентация в пространстве которых подтверждены несколькими информативными слоями, фиксируются (группирование, слияние) и переносятся на отдельный итоговый слой. Полученная в результате этих операций итоговая линеаментная схема подвергается дальнейшей верификации на геологической основе и сопоставляется с сводными и обобщенными картами и схемами (неотектонической, геодинамической, распределение очагов землетрясений и др.). Учитывая различие в масштабах фактологического материала, допускается наличие допустимых погрешностей в положении и размере выделенных линеаментов.

Учет априорной геологической информации играет важнейшую роль при составлении схемы тектонического районирования региона исследований. На геологической основе применяются способы, имеющие определенную избирательность на моделирование латерального распределения структурно-вещественных неоднородностей земной коры и картирование коровых блоков. Пространственное положение каждого линеамента сопоставляется с данными геологического картирования. В визуальном режиме производится отбраковка линеаментов, противоречащих геологической основе. Учет погрешностей, связанных с различием масштабов картографических основ, является единственным допущением при проведении процедуры верификации. Помимо верификации линеаментной схемы на геологической основе, высокую информативность дали результаты сопоставления фактологического материала с картой активных разломов территории России и прилегающих областей под редакцией Трофимова В.Г.

Положение очагов землетрясений играло дополнительную вспомогательную роль при проведении процедур отбраковки.

Итогом проведенных построений является схема пространственного распределения структурно-вещественных неоднородностей БСЗ, отражающая строгую пространственную привязку последних на дневной поверхности. Полученная схема является отправной точкой для операций моделирования вертикального распределения структурно-вещественных неоднородностей.

2.4. Моделирование вертикального распределения структурно-вещественных неоднородностей земной коры БСЗ

Строго установленное пространственное положение структурно-вещественных неоднородностей на дневной поверхности служит отправной точкой для проведения операций глубинного моделирования блоков, зон и отдельных разрывных дислокаций. Основополагающую роль на этих этапах играют различные геофизические разрезы и модели, полученные в результате отработки опорных геофизических профилей МОВ-ОГТ «1-СБ», «3-ДВ» (южный участок), а также геотраверсов ГСЗ -МОВЗ «Абакан – Тында - Татарский залив» и «Тында-Амурзет» проекта БАЗАЛЬТ. Результаты каждого геофизического метода несут информацию о характеристиках земной коры БСЗ (скорость продольных и поперечных волн, плотность, намагниченность, удельного электрического сопротивления и т.д.). Комплексная интерпретация всего набора данных позволила оценить параметры трехмерного распределения структурно-вещественных неоднородностей БСЗ. На данной стадии работ сохраняется строгая упорядоченность действий в работе с материалами, что обеспечивает высокую степень достоверности выдвигаемых научно-теоретических заключений.

Способы промежуточной обработки сейсмических разрезов. Узловую роль в комплексе геолого-геофизических данных играют данные сейсморазведки глубинного МОВ-ОГТ. В регионе исследований этим методом отработаны два профиля, пересекающие БСЗ вкрест простираения. Профиль «1-СБ-Восточный», заложенный в север-северо-западном направлении, пересекает, наряду с БСЗ, несколько блоков земной коры и межблоковых зон. Наибольший интерес из их числа представляет Монголо-Охотская шовная зона, имеющая значимую сдвиговую составляющую тектонических движений смежных блоков земной коры. Профиль «3-ДВ» расположен восточнее, его трасса пересекает южную часть Сибирского кратона, Становой и Алданский блоки, а также расположенную южнее Монголо-Охотскую шовную зону. Принципиальную информацию об особенностях глубинного строения земной коры несут сейсмические разрезы МОВ-ОГТ в показатели рефлексивности. Процедуры подобных расчетов реализованы автором с использованием одного из алгоритмов статистического анализа пакета программы ArcMap. Алгоритм обеспечивает расчет в скользящем окне числа отражающих площадок (рефлекторов) на единичную площадь сечения [Агеев и Егоров, 2017 б)]. Опыт ранее проведенных исследований [Егоров, 2004] свидетельствует о более контрастном проявлении элементов радиальной расслоенности земной коры в таком варианте представления сейсморазведочных данных. Результаты проведенных работ методом отраженных волн в районе заложения сверхглубоких скважин СГ-3 (Россия) [Козловский и др., 1984, Орлов и др., 1998] и КТБ (Германия) [Rabbel и др., 2004 и др.] показали, что субгоризонтальные и слабонаклонные

высоко-рефлективные пачки чаще всего маркируют положение разрывных нарушений. На таких моделях фиксируется высокая гетерогенность земной коры БСЗ и широкое проявление складчато-надвиговых деформаций в верхней части разреза. Характерной особенностью земной коры на средне- и нижнекоровых горизонтах является чередование сейсмически расслоенных и прозрачных субгоризонтальных зон. Сопоставление полученного набора параметров МОВ-ОГТ с материалами ГСЗ свидетельствует о том, что скоростные границы земной коры по данным ГСЗ чаще всего соответствуют подошвам высокорективных субгоризонтальных пачек разрезов МОВ [Егоров, 2004].

Способы решения обратной задачи теории потенциала. Освещение способов аналитического продолжения потенциальных полей в нижнее полупространство при проведении данных исследований заслуживает детального рассмотрения, так как эта задача характеризуется неустойчивостью и неоднозначностью своего решения. На сегодняшний день существует несколько способов решения обратной задачи теории потенциала. В ходе авторских исследований предпочтение отдавалось способу томографии потенциальных полей, разработанному Штокаленко М.Б. (ФГУНПП "ГЕОЛОГОРАЗВЕДКА") [Алексеев и др., 2010]. В алгоритмах томографии потенциальных полей можно выделить 3 этапа:

1. поле разбивается на несколько сопоставимых по амплитуде частотных составляющих и неинтерпретируемый низкочастотный остаток;
2. устанавливается соответствие выделенных составляющих поля с глубинами исследуемой толщи;
3. для каждой составляющей поля решается обратная задача в виде распределения источников поля по горизонтальной плоскости на установленной глубине или по слою, локализованному в пределах заданного диапазона глубин [Алексеев и др., 2017].

Далее эффективная, т.е. расчётная плотность или намагничённость любой точки исследуемой толщи может оцениваться интерполяцией между полученными горизонтальными слоями решения. Основным преимуществом данного способа является возможность оценки пространственного соотношения блоков земной коры и межблоковых зон, что представляет наибольшую ценность в проводимых исследованиях. Достоверность выбранного методического приема подтверждается тем фактом, что результаты, полученные в ходе опытно-методических работ, были неоднократно подтверждены на сейморазведочных, геоэлектрических данных и данных бурения. К его достоинствам можно отнести и высокую чувствительность к слабым наложенным аномалиям, устойчивость получаемых решений и возможность применения к данным любого масштаба. Следует отметить, что наряду с очевидными преимуществами данный способ имеет и свои недостатки, которые заключаются в присутствии на расчетных моделях косых наводок от интенсивных аномалий. Эти ошибки можно подавить в процессе работы с

данными при помощи медианной фильтрации. Предложенный разработчиком способ «второго приближения»: разность фактического и расчётного полей преобразуется в пространственное распределение поправки к эффективной плотности или намагниченности. Расчётные поля первого и второго приближения складываются, что даёт ощутимое приближение к фактическому полю [Алексеев и др., 2016]. Эти операции позволяют значительно повысить достоверность итогового материала (Рисунок 30).

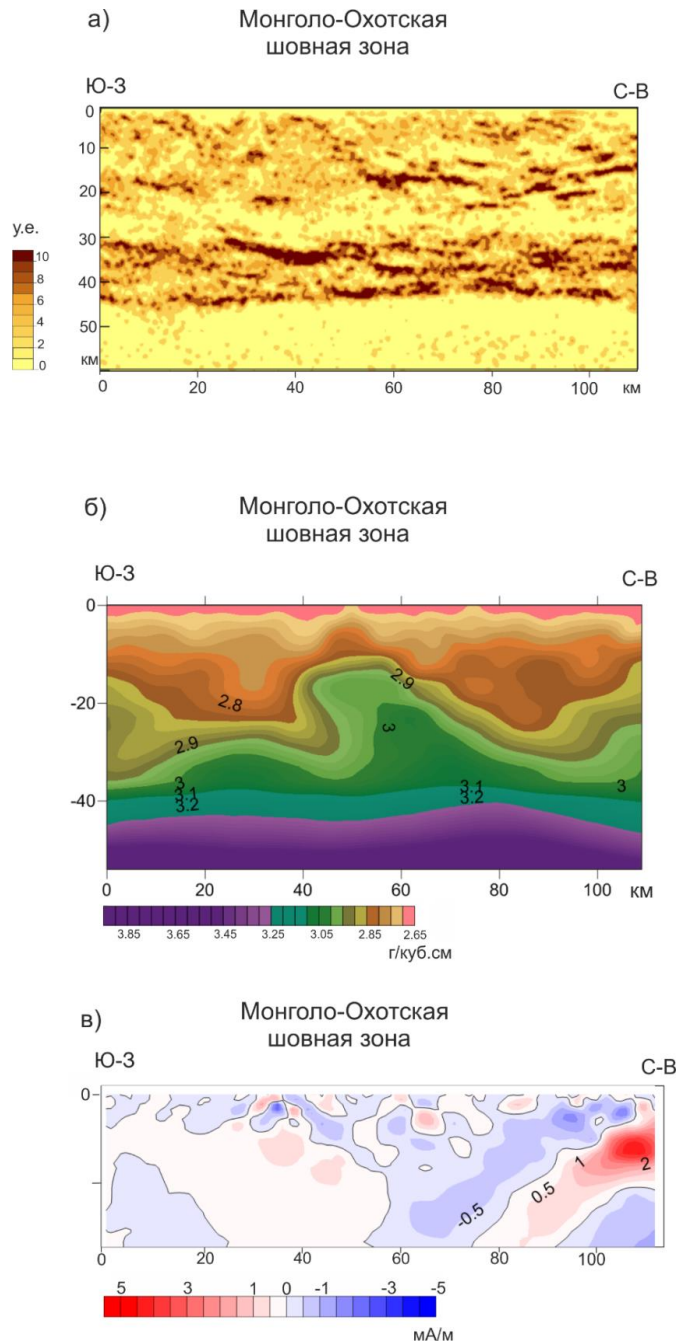


Рисунок. 30 Геофизические разрезы земной коры в сечении профиля «3-ДВ» (южный участок): а) – сейсмический разрез МОВ-ОГТ в показателях рефлексивности (с использованием данных ЦГГФ ФГБУ «ВСЕГЕИ»); б) псевдоплотностной разрез земной коры; в) – модель отражающая распределение эффективной намагниченности в земной коре (до 30 км).

Для упрощения дальнейших процедур комплексной интерпретации положение синтетических профилей, вдоль которых было проведено решение обратной задачи, было привязано к опорным профилям «1-СБ» и «3-ДВ» (южный участок).

Итоговыми результатами проведенных операций является набор сечений, отражающих распределение эффективных плотностей и эффективной намагниченности в разрезе земной коры.

В ходе исследований, наряду с методом томографии потенциальных полей, для изучения латерального распределения структурно-вещественных неоднородностей на глубине обратные задачи были рассчитаны с использованием алгоритма И.Б. Мовчана [Movchan и Yakovleva, 2014]. Методически подход опирается на оптимальную узкополосную фильтрацию пространственного сигнала с «вейвлетным разубоживанием выборки». Полученные результаты привнесли дополнительную информацию о глубинном строении земной коры БСЗ и позволили подчеркнуть ее высоконеоднородную структуру на глубинных горизонтах.

Проецирование очагов землетрясения Процедуры выноса на сейсмический разрез в показателях рефлексивности очагов землетрясений проводились в полуавтоматическом режиме с использованием стандартных алгоритмов пространственного анализа пакета программ ArcGIS и последующей визуализации результатов в программе Corel Draw. Начальным этапом в этой работы является определение параметров полосовой зоны, в пределах которой происходит выборка сейсмических очагов. Опыт ранее проведенных исследований свидетельствует о том, что ширина этой области главным образом зависит от уровня сейсмичности региона. В работах в тектонической зоне Верхнерейнского грабена максимальные удаления составляли до 10 км [Maueг и др., 1997]. Эти же дистанции проецирования применялась и в исследованиях на японских островах [2017_Yapo_Earthquakes]. Максимальные удаления в тектонических зонах Сан Андреас и Альпийского разлома не превышали 5 км [Jones и др., 1994]. Для Байкало-Становой сдвиговой зоны было определено максимальное расстояние в 10 км.

Способы линеаментного анализа глубинных разрезов и моделей. Процедуры линеаментного анализа глубинных разрезов и моделей в первую очередь ориентированы на выделение зонально-блоковой структуры земной коры на глубинных горизонтах. Данные операции унаследуют общие принципы линеаментного анализа для площадных данных. Следует отметить, что закартированное положение разрывных нарушений на дневной поверхности рассматривается в качестве важнейшей априорной информации. Процедуры линеаментного анализа глубинных разрезов и моделей носят по большому счету вспомогательную роль при проведении комплексной интерпретации.

Формирование модели глубинного строения земной коры. Основополагающим звеном при моделировании вертикального распределения структурно-вещественных неоднородностей земной коры является проведение комплексной интерпретации набора геолого-геофизических данных, полученных в результате промежуточной обработки и монометодной интерпретации отдельных геофизических методов. Следует отметить, что принципиальное значение в процессе интерпретации приобретает максимально полное использование как практических данных (региональных, сводных моделей глубинного строения), так и учет научно-теоретических представлений о природе структурно-вещественных неоднородностей земной коры.

Для решения поставленной задачи информационные слои (глубинный сейсмический разрез в показателях рефлективности, псевдоплотностная модель, модель распределения эффективной намагниченности земной коры, линеаментные схемы) пространственно взаимоувязываются, масштабируются и визуализируются на экране монитора. Принципиальную информацию о глубинной морфологии земной коры привносит анализ распределения очагов землетрясений в земной коре и учет данных реологического моделирования. В ходе комплексной интерпретации материала реализуются приемы визуального сопоставления и картографического анализа.

Полученные на данном этапе работ модели, отражающие морфологию структурно-вещественных неоднородностей в вертикальном измерении позволяют качественно оценить интенсивность деструкции земной коры и в дальнейшем перейти к формированию обобщенной физико-геологической модели земной коры БСЗ.

Таким образом, разработанная методика позволяет проводить качественную и в некоторой степени количественную оценку интенсивности деструкции земной коры, как в латеральном, так и вертикальном измерениях. Отличительной чертой данной методики является учет данных реологических и сейсмологических исследований, что позволяет дополнить традиционный набор геолого-геофизических методов, используемых в ходе интерпретации, и повысить достоверность получаемых результатов.

Практическое применение данной методики было найдено при проведении обработки и комплексной интерпретации геолого-геофизических материалов как в полосе геотраверса «1-СБ», так и для всей области развития Байкало-Становой сдвиговой зоны. Результаты этих исследований приводятся в Главе 3 данной работы.

Глава 3 Особенности глубинного строения земной коры Байкало-Становой и Монголо-Охотской сдвиговых зон в сечении геотраверса 3-ДВ

3.1 Фактологическая основа исследований

Байкало-Становая региональная сдвиговая зона простирается более чем на 1500 км в восток-северо-восточном направлении от оз. Байкал до побережья Охотского моря. Эта обширная территория включает в себя восточную часть Иркутской области, Республику Бурятия, Забайкальский край, южную часть Республики Саха (Якутия), Амурскую область, Хабаровский край – что в сумме составляет около 600 000 км². Значительный объем работ по геологическому картированию этого региона был выполнен во второй половине XX в. Новый импульс в изучении земной коры юга Сибирской платформы придали комплексные геолого-геофизические работы в полосовых зонах опорных геофизических профилей (геотраверсов), выполненные в последние десятилетия XX века и в начале XXI века.

Данные геологических съемок, тектонических и неотектонических картографических основ

Современные знания о геологическом строении Байкало-Становой региональной сдвиговой зоны, простирающейся пределах листов О-48-53; N-48-53 государственной геологической карты масштаба 1:1 000 000, являются результатом многолетней работы геологов отраслевых и академических институтов: Геолком, ЦНИГРИ, ВСЕГЕИ, СНИИГиМС, ИТиГ, ИМГРЭ, МГУ, СОПС ЯФ СО АН СССР, ЛАГЕД АН СССР, ВостСибНИИГиМС и др.) территориальных и специализированных производственных организаций (Аэрогеология, Алданзолото, Золоторазвека, Дальзолото, Главзолото, Таёжгеология, Приленскгеология, ДВГУ, Якутскгеология, Алдангеология, Амургеология, Читагеология и др.).

На сегодняшний день наиболее актуальными являются геологические основы масштаба 1: 000 000 государственной геологической карты третьего поколения, изданные ФГБУ «ВСЕГЕИ» и представленные в цифровом виде. Обеспечение территории исследований данными материалами отражено на Рисунке 31.

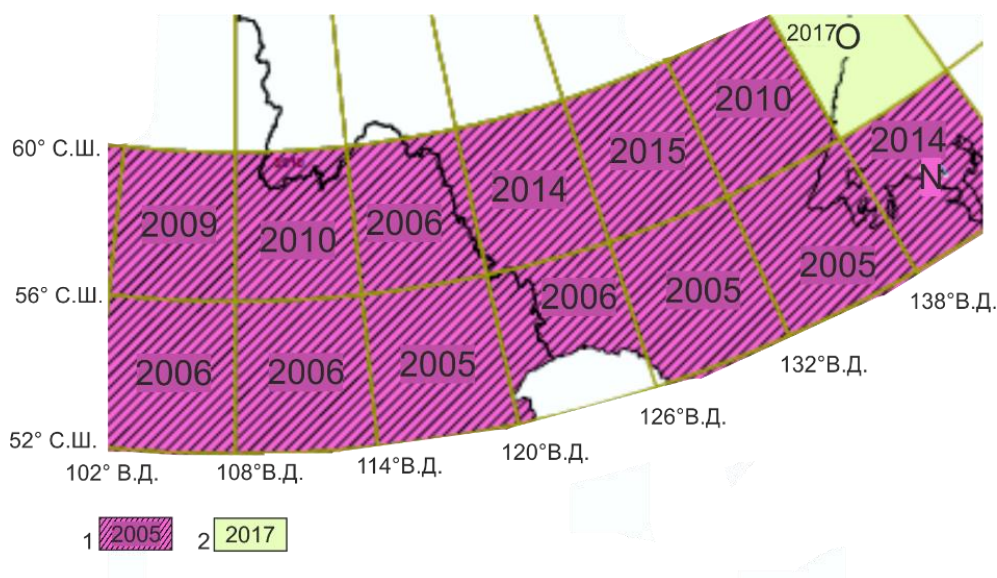


Рисунок 31 Схема обеспечения территории развития БСЗ геологическими основами третьего поколения (м-б 1: 1 000 000) [URL: <http://www.vsegei.ru/ru/info/izuchennost/current.php>]

Условные обозначения 1: Завершенные подготовленные к изданию комплектами, апробированы на научно-редакционном совете (указан год завершения подготовки к изданию); 2 – завершенные авторские варианты (указан год подготовки к изданию)

Наиболее значимыми результатами геологического картографирования является составление тектонических карт и схем Забайкальского и Дальневосточного регионов различных масштабов. Среди последних следует выделить ряд основополагающих работ В.Е. Хаина, С.Л. Костюченко, Ю.Г. Леонова, Л.П. Зонешайна, А.С. Егорова, С.П. Шокальского. Значительный вклад в познание строения земной коры внесли работы: К.Г. Леви, С.И. Шермана, Л.М. Парфенова, М.И. Кузьмина, В.А. Санькова, А.В. Парфеев и др.

Большое значение в ходе исследований придавалось анализу неотектонических схем и карт активных разломов территории исследований. Среди таковых следует выделить: карта активных разломов России и смежных областей [Трофимов и др., 1987], карта активных разломов Евразии [Бачманов и др., 2017], карта активных разломов юга Восточной Сибири [Лунина и др., 2010] и сейсмотектоническая карта Восточной Сибири [Имаев и др., 2015].

Таким образом на всю территорию развития Байкало-Становой сдвиговой зоны имеется значительные объемы геологических данных, отражающие основные черты строения земной коры региона.

Данные геофизических исследований

Территория развития Байкало-Становой сдвиговой зоны характеризуется умеренной геофизической изученностью, существенно менее детальной в сравнение с североамериканской зоной Сан-Андреас и европейским Рейнским грабеном. Основной объем геофизических исследований, составляющих банк данных, относится к полосовым зонам опорных геофизических профилей.

Материалы сейсморазведочных исследований

Узловое положение в составе рабочего банка данных занимают результаты сейсморазведочных исследований, выполненных методами глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) и отраженных волн (МОВ-ОГТ).

Сейсморазведка ГСЗ была выполнена Центром ГЕОН в рамках проекта «Базальт» в 1990-х годах. Проект включал в себя два геотраверса, пересекающих исследуемую Байкало-Становую сдвиговую зону в субпараллельном и субмеридиональном направлениях (Рисунок 32). Итоговые разрезы, составленные под редакцией А.В.Егоркина и С.Л.Костюченко [URL: <http://www.vsegei.ru/ru/info/seismic/>], представляются в виде системы скоростных доменов толщиной 10-15 км и протяженностью до 100 км, разделяемых субгоризонтальными, вертикальными и наклонными границами и отражающие скоростную параметризацию земной коры до глубин 60 км.

Глубинные сейсмические зондирования (ГСЗ) выполнены и в процессе отработки комплекса геофизических съемок в зонах более современных геотраверсов «1-СБ» и «3-ДВ» в рамках государственной программы развития сети опорных геофизических профилей. Обработкой и построением итоговых скоростных моделей земной коры занимались ученые и специалисты ФГБУ «ВСЕГЕИ», АО СНИИГиМС и других организаций. Основным преимуществом полученных разрезов, наряду со скоростной параметризацией земной коры, является маркирование в сечении разрезов региональных сейсмических границ, в том числе границы Мохоровичича, метками преломленных, отраженных и обменных волн.

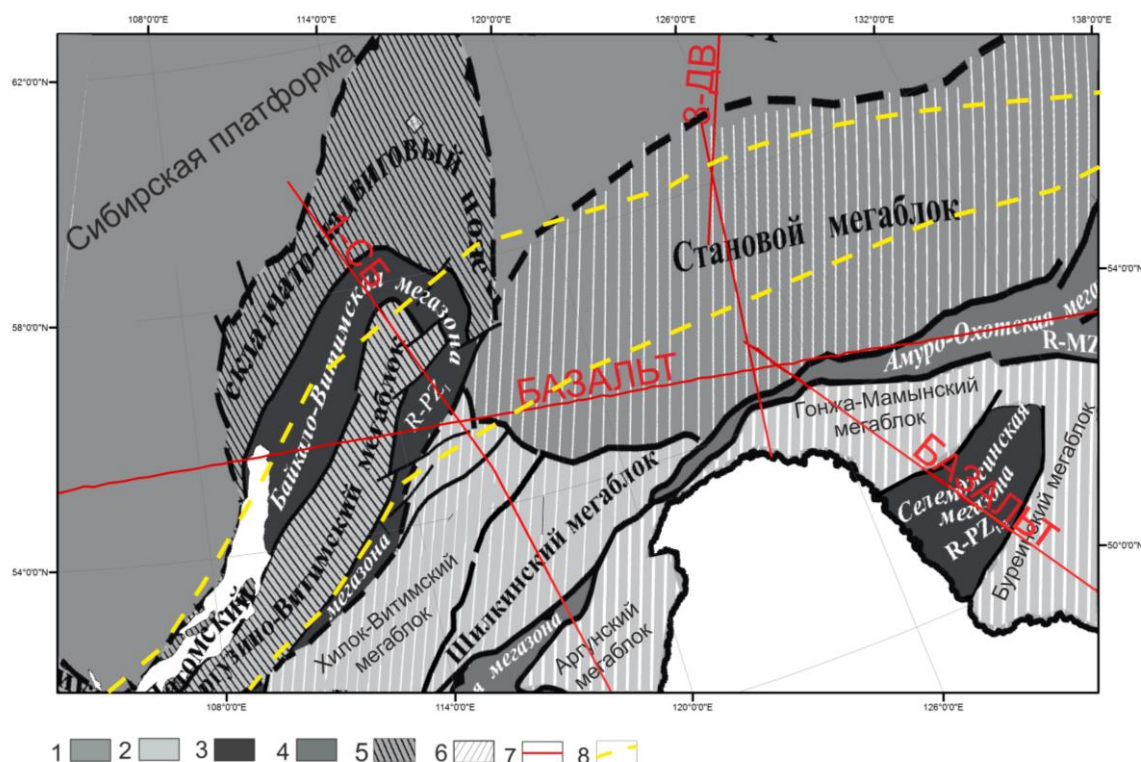


Рисунок 32 Расположение опорных геофизических профилей (геотраверсов) вдоль , пересекающих Байкало-Становую сдвиговую зону.

Условные обозначения: 1-2 - блоки с древней корой континентального типа: 1- Сибирской платформы, 2- фанерозойских складчатых областей; 3-4 – межблоковые сутурные зоны: 3 – эпикаледонские и эпигерцинские, 4 - эпикиммерийские; 5-6 - ареалы складчатых деформаций на окраинах блоков с древней корой континентального типа: 5 - эпикаледонские, 6 - эпикиммерийские; 7 – геотраверсы; 8 – ареал развития Байкало-Становой сдвиговой зоны.

Ведущую роль в составе геотраверсов нового поколения «1-СБ» и «3-ДВ» играют сейсморазведочные исследования глубинного МОВ-ОГТ. Эти материалы несут основополагающую информацию о закономерностях пространственного распределения структурно-вещественных неоднородностей земной коры. В частности, они обеспечивают уверенное моделирование границ блоков и межблоковых зон и их внутреннюю сегментацию. На них отчетливо прослеживаются субгоризонтальные региональные сейсмические горницы.

Результаты исследований потенциальными геофизическими методами:

В рамках государственной программы по созданию, актуализации и подготовке к изданию сводных и обзорных карт территории Российской Федерации были выполнены работы по обеспечению геологической карты третьего поколения геофизической информацией. В пределах территории развития Байкало-Становой сдвиговой зоны подготовлены и изданы геофизические основы аномального магнитного поля и поля силы тяжести масштаба 1: 1 000 000. Наряду с этим,

этот регион покрыт сводными картами геофизических полей. Данные потенциальных геофизических полей и их трансформант играют важную роль при моделировании латерального распределения структурно-вещественных неоднородностей и оценке характера деструкции земной коры.

Материалы дистанционных исследований:

Территория развития Байкало-Становой сдвиговой зоны практически полностью обеспечена космоснимками масштаба 1: 1 000 000. Исключение составляют листы государственной геологической карты N 50-52. Недостаток информации компенсируется использованием в ходе исследования интегральной дистанционной основы (разрешение 1 пиксель изображения = 150 м. на местности).

В обработку и последующую комплексную интерпретацию вовлекаются как композиционные космоснимки (комбинация нескольких каналов), так и одноканальные дистанционные основы.

Необходимо отметить, что современные деформации Байкало-Становой сдвиговой зоны имеют характерное проявление в рельефе территории. Таким образом, данные дешифрирования космоснимков приобретают чрезвычайно важное значение в процессе операций моделирования латерального распределения блоков, межблоковых зон и разрывных нарушений. Кроме того, в рамках исследований учитывались опубликованные результаты геологической интерпретации космических съемок [Щеклов и др., 1980, Лопатин, 1992].

Материалы сейсмологических исследований:

Данные о пространственном распределении очагов землетрясений играют важную роль, как на стадии моделирования латерального распределения структурно-вещественных неоднородностей, так и на стадии моделирования последних в вертикальном измерении. В связи с этим, чрезвычайно важным представляется сбор максимально возможной информации о сейсмичности региона, глубине и механизмах очагов землетрясений. Анализ последних позволяют оценить кинематические параметры как отдельной тектонической дислокации, так и всей зоны.

В фактологический банк данных были включена выборка по землетрясениям, зарегистрированным в пределах всего ареала развития БСЗ из сейсмологических каталогов Геофизической службы РАН (г. Обнинск), Байкальского филиала Геофизической службы РАН. и ежегодников "Землетрясения в СССР за период с 1962 по 1991 год., изданных под редакцией Н.В.Кондорской и др. в издательстве "Наука". Наряду с этим, использовались данные из каталога землетрясений, произошедших в сейсмоактивных регионах Северной Евразии. Этот каталог

составлен на основе данных, опубликованных в ежегодниках "Землетрясения Северной Евразии, СССР в 1992 - 2009 году", издаваемых под редакцией О.Е.Старовойта и др. в Геофизической службой РАН в Обнинске. Погрешность определения эпицентра землетрясения составляла в среднем 3-5 км, погрешность определения глубины гипоцентра составляла около 5 км.

В ходе исследований были также задействованы каталоги американской геологической службы [URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>] (Таблица 1). Величины погрешностей определения параметров находились в сопоставимых с предыдущими источниками данных интервалах.

Таблица 1 Фрагмент сейсмологического каталога американской геологической службы (USGS)

Год	Широта	Долгота	Гипоцентр, км	Простираие,	Падение, град	Направление, град
1981	54.012	108.793	33	251	67	-87
1987	54.4	110.33	15	176	33	-114
1987	56.67	121.59	16	260	27	-91
1989	57.166	121.976	22	131	79	74
1989	57.03	121.23	48.3	101	82	35
1989	57.13	121.8	45.9	182	73	-177
1989	57.07	122.03	29	277	77	-43
1989	57.81	118.65	15	233	51	-100
1990	56.26	110.62	15	215	56	-149
1991	54.68	110.7	32.6	235	25	-65
1992	53.88	108.87	20	249	33	-65
1994	56.84	117.73	17	216	70	-99
1994	56.761	117.9	11	235	48	-72
1994	56.79	117.81	15	235	48	-79
1995	56.25	114.31	21	197	54	-115
1999	55.856	110.385	10	200	59	-158
1999	55.896	110.214	10	282	22	-80
1999	55.896	110.214	10	200	59	-158
1999	55.942	110.272	10	206	35	-109

Определение кинематических параметров сейсмических подвижек является возможным благодаря расчёту механизмов очагов землетрясений, которые являются одним из важнейших параметров, характеризующих сейсмическое событие. Механизм отражает одновременно пространственную ориентацию осей главных напряжений, возможных плоскостей разрывов и подвижек в очаге землетрясения. Расчет выполняется на основании знаков первых вступлений записей короткопериодных приборов, установленных на сейсмических станциях. Параметры фокальных механизмов: простираие (Strike), Падение (Dip), и Направление (Rake) являются основными характеристиками нодальных плоскостей. Одна из двух плоскостей является

проекцией истинной плоскости разлома, по которой произошла подвижка. Вторая плоскость - вспомогательная.

Простираение плоскости сейсмоактивного разлома может варьировать от 0^0 до 360^0 ; падение от 0^0 (горизонтальная плоскость) до 90^0 (вертикальная плоскость). Направление смещения по разлому определяется через угол (RAKE) между простираением и вектором подвижки. Пределы его изменения: от 0^0 до $\pm 180^0$. На картографических основах рассчитанный механизм очага землетрясения отображается в виде круга с закрашенными и не закрашенными областями, пространственное соотношение которых позволяет судить о типе подвижки в очаге и, следовательно, о типе разлома (Рисунок 34).

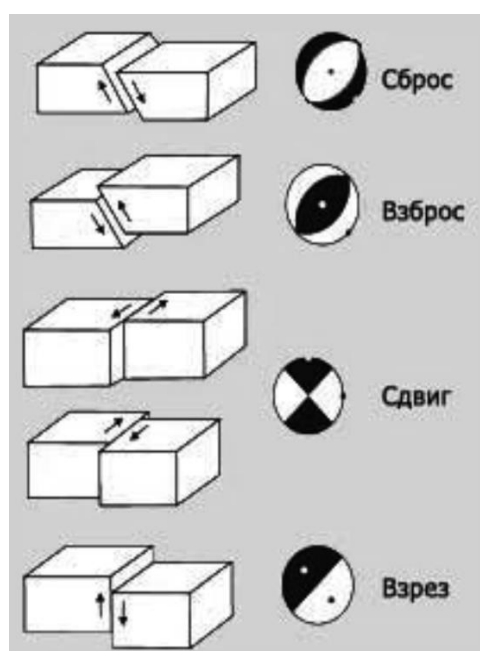


Рисунок 33. Типы смещений по разломам и соответствующие им стереограммы механизмов по [URL: <https://earthquake.usgs.gov/learn/topics/beachball.php>] в редакции автора

Материалы геотермических исследований:

Основными объектами исследований геотермическим методом являются глобальные структуры земной коры. Опыт ранее проведенных исследований свидетельствует о том, что границы между выделенными геоструктурами часто маркируются контрастными геотермическими градиентами. В связи с этим результаты геотермических исследований несут в себе принципиально важную информацию, необходимую для анализа ареала развития Байкало-Становой сдвиговой зоны.

В рабочий банк данных были включены результаты измерения теплового потока на территории развития БСЗ, систематизированные в банке данных при составлении карты

теплового потока ФГБУ «ВСЕГЕИ» под редакцией А.А. Кирсанова и Т.П. Литвиновой [Кирсанов и др., 2006]. Всего в обработку вошло около 4500 физических точек наблюдения, большинство из которых располагается в районе оз. Байкал. Восточнее плотность сети наблюдений значительно снижается, вследствие чего здесь возможна только качественная оценка структуры земной коры.

3.2 Моделирование латерального распределения структурно-вещественных неоднородностей Байкало-Становой и Монголо-Охотской сдвиговых зон

В ходе авторских исследований были проведены операции моделирования латерального распределения структурно-вещественных неоднородностей Байкало-Становой сдвиговой зоны. В процессе их реализации в работу был вовлечен весь комплекс систематизированной геолого-геофизической информации, составляющей рабочий банк данных. Первоочередной задачей при проведении моделирования является выполнение линеamentного анализа (визуального и автоматизированного) исходных потенциальных геофизических полей, их трансформант и космоснимков. Сопоставление линеamentных схем геофизических полей и космоснимков проводилось с привлечением данных неотектонических исследований. Следующим этапом являлось верификация выделенных тектонических дислокаций на геологической основе. В процессе верификации были приняты во внимание результаты многолетних теоретических и экспериментальных исследований, направленных на изучение принципов формирования как отдельных дизъюнктивов, так и систем разрывных нарушений. Результатом этой многостадийной работы стала составление схемы пространственного распределения тектонических нарушений Байкало-Становой региональной сдвиговой зоны (Рисунок 34).

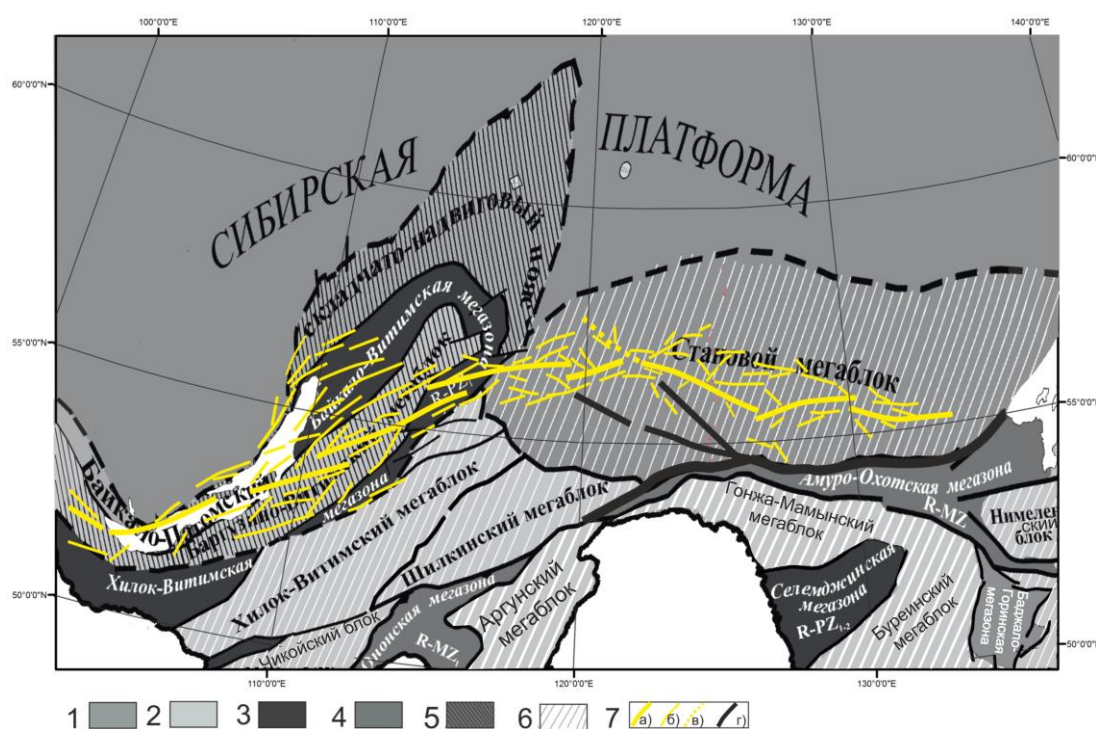


Рисунок 34 Морфология тектонических нарушений Байкало-Становой сдвиговой зоны. Схема тектонического районирования по [Егоров, 2004].

Условные обозначения: 1-6 такие же как на рисунке 32; 7 – тектонические нарушения: а) – главный шов, б) – оперяющие дислокации, в) – предполагаемые, г) – Монголо-Охотской шовной зоны

Сопоставление линейных особенностей геофизических полей и других карт и схем позволили закартировать и фрагментарно проследить на площади магистральный разлом от осевой части южного фланга оз. Байкал в восток-северо-восточном направлении до побережья Охотского моря. Шов дискордантно пересекает Баргузино-Витимский мегаблок, Байкало-Витимскую сутурную мегазону и далее трассируется в пределах Станового мегаблока. Необходимо отметить, что на всем протяжении магистральный шов не формирует единую структуру. Кроме того, картируется большое число второстепенных разломов, которые часто выступают в роли тектонических «перемычек» между сегментами главного шва. Отмечается их кулисообразная и в ряде случаев линейная геометрическая форма.

Характерной особенностью магистрального шва является его изогнутая форма. В области этого изгиба закономерно картируются многочисленные оперяющие дислокации в соответствии с необходимыми тектонофизическими условиями, при которых возможно их заложение и дальнейшее развитие [Семинский, 2003].

С опорой на материалы тектонофизических исследований было проведено сопоставление наблюдаемой картины распределения тектонических дислокаций исследуемой зоны с теоретической моделью эллипсоида деформаций левого сдвига [Агеев и др., 2017]. Результаты этого анализа свидетельствуют о возможности интерпретации многочисленных оперяющих дислокаций как синтетических (R-сколы Риделя) и антитетических (R'-сколы Риделя) разломов, расположение которых относительно друг друга и главного шва согласуется с распределением тектонических нарушений в этой теоретической модели. Наряду с этим, для наиболее сильных землетрясений БСЗ было проведено определение механизма их очагов (Рисунок 35).

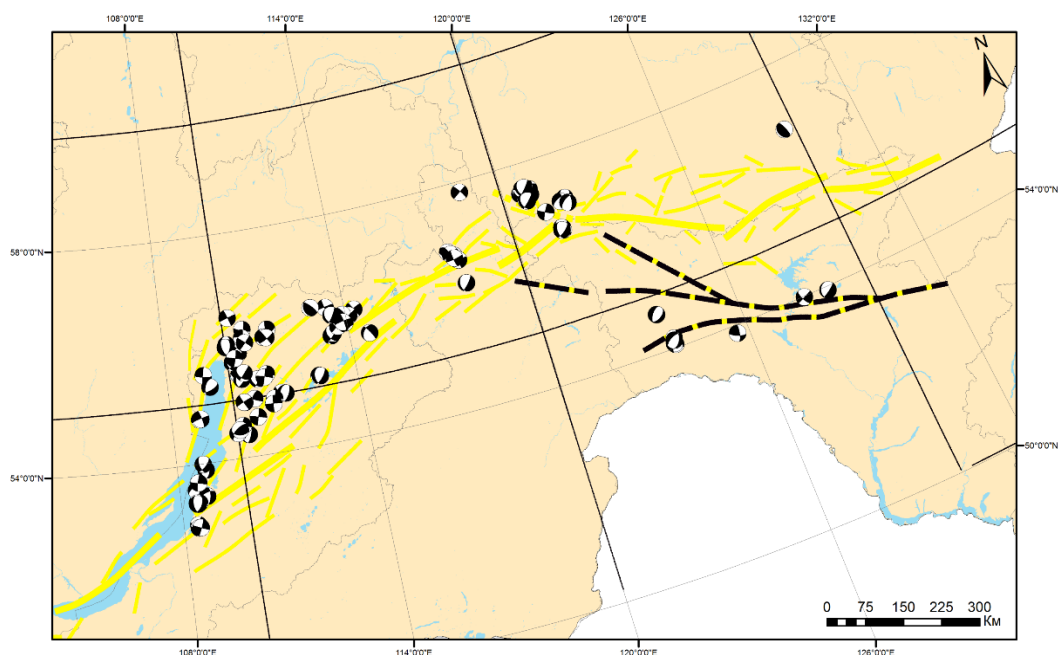


Рисунок 35 Фокальные механизмы землетрясений Байкало-Становой региональной сдвиговой зоны (выделены желтым) и смежной Монголо-Охотской шовной зоны (выделены черным пунктиром).

Условные обозначения:

 - механизм очага землетрясения: белые области отражают области растяжения, закрашенные – области сжатия

Результаты анализа распределения фокальных механизмов свидетельствует о том, что наряду с многочисленным проявлением сдвиговой кинематики широко картируются сбросы и сбросо-сдвиги. Наиболее отчетливо это наблюдается вблизи оз. Байкал. При продвижении на восток количество разломов с наличием сбросовой кинематики уменьшается. Здесь картируются разломы сдвиговой, надвигово-сдвиговой кинематики. Необходимо отметить, что вышесказанные научно-теоретические заключения о кинематических параметрах разломов подтверждаются аналогичными выводами многих исследователей этого региона [Имаев и др., 2015].

Закартированные разломы различных морфокинематических типов играют ключевую роль в контроле сейсмичности региона исследований. Среди всего многообразия выделенных тектонических нарушений присутствуют как разломы древнего возраста заложения (протерозойские), так и более молодые - позднемезозойские и кайнозойские. Проведение возрастного ранжирования дислокаций является чрезвычайно сложной задачей, так как многие из древних разломов активны и в настоящее время. Однако необходимо отметить, что

большинство приведенных на схеме разломов имеет молодой – неоген-четвертичный возраст заложения.

Интересной особенностью, установленной по результатам анализа латерального распределения структурно-вещественных неоднородностей, является наличие пространственной связи БСЗ по системе оперяющих дислокаций с развивающейся южнее Монголо-Охотской шовной зоной, также имеющей левостороннюю сдвиговую кинематику. Установлено, что сочленение этих региональных сдвиговых зон происходит в области наибольшего изгиба трассы магистрального шва БСЗ. Учитывая вышесказанное автором предполагается подобие черт латерального распределения тектонических дислокаций БСЗ и Сан Андреас. Последняя имеет пространственное сочленение с параллельно развивающимися сдвиговыми зонами Уолкер-Лэйн и Восточно-Калифорнийской сдвиговой зоной со сходной сдвиговой кинематикой.

3.3 Связь результатов исследования глубинного строения Байкало-Становой региональной сдвиговой зоны с распределением источников минеральных вод региона

Выполненные исследования глубинного строения Байкало-Становой региональной сдвиговой зоны, помимо развития решения научно-теоретических проблем строения и эволюции региона могут иметь практическое применение в широком спектре задач природопользования. В качестве примера автором представлены результаты сопоставления гидротермальных месторождений на территории исследования и геолого-структурных элементов тектонического районирования региона, сведенные на схеме закономерностей локализации источников минеральных вод (Рис. 36).

Геолого-структурные построения представлены в виде фрагментарно проявленного магистрального разлома БСЗ, Монголо-Охотского шва, структур сочленения этих сдвиговых зон, системы оперяющих дислокаций главного шва БСЗ. Фактологический материал был получен в результате комплексной интерпретации геолого-геофизических данных, методическая часть которой детально описана в предыдущих главах данной работы.

Гидрогеологические данные представлены в форме: ареалов гидрогеологических областей, которые были получены с карт гидрогеологического районирования республики Саха (Якутия), Читинской области и Хабаровского края [Гидрогеология СССР, 1970] и источников минеральных вод (водопункты).

Традиционные схемы гидрогеологического районирования базируются на изучении совокупности физико-географических (геологическое строение, рельеф, климат и т.д.) и гидрогеологических (разгрузка, режим подземных вод, величина стока и т.д.) признаков [Гледко Ю.А., 2012]. Таким образом, в пределах территории развития Байкало-Становой региональной сдвиговой зоны были выделены несколько крупных гидрогеологических областей: Байкальская,

Селенгинская, Даурская и Алданская. Исследователями региона установлено, что преимущественное проявление здесь имеют трещинно-жильные минеральные воды фундамента, которые выходят на поверхность непосредственно из трещин в кристаллических образованиях или перекрывающих их отложений [Гидрогеология СССР, 1970]. Наряду с вышеуказанными признаками, каждая из выделенных областей, характеризуется своим химическим составом вод.

Проведенные в рамках данной работы исследования закономерностей локализации источников минеральных вод и тектонических нарушений БСЗ позволили выявить ряд интересных закономерностей

- 1) Область вдоль главного шва характеризуется небольшим количеством закартированных водопунктов;
- 2) Конкретные ареалы проявления наибольшего количества гидротермальных месторождений сосредотачиваются в зонах опережающих дислокаций.

В пределах развития сдвиговой зоны отчетливо выделяется три ареала повышенной концентрации водопунктов. Первый локализован вблизи оз. Байкал. Здесь разломы, к которым тяготеют водопункты, характеризуются простираем преимущественно в ССВ направлении. Второй ареал развивается в области 120° В.Д. Ориентировка по простираению разломов также ССВ. Третий ареал локализован восточнее (125° В.Д.) со сходным простираем тектонических нарушений. Результаты анализа теоретической модели левосдвигового эллипсоида деформации и механизмов очагов землетрясений свидетельствуют о том, что в пределах выделенных ареалов разломы, наряду со сдвиговой, имеют значительную сбросовую составляющую, формируя таким образом ареалы растяжения.

Исследование связи химического состава вод и тектонической обстановки не выявило какой-либо корреляции. Полученная информация может указывать на зависимость химического состава вод непосредственно от вещественного состава вмещающих пород.

Результаты проведенных исследований позволяют сделать принципиальные научно-теоретические заключения о том, что общие закономерности локализации источников минеральных вод соответствуют направлению простираения сдвиговой зоны (СВ). Однако, при детальном рассмотрении установлено, что преимущественная локализация последних наблюдается в зонах опережающих дислокаций. Тектонические нарушения, к которым приурочены водопункты, характеризуются значительной сбросовой составляющей. Эти области формируют ареалы растяжения, в которых происходит разгрузка современных тектонических напряжений и, соответственно, локализуются источники минеральных вод.

3.4 Моделирование структурно-вещественных неоднородностей земной коры в вертикальном измерении

Приведённая в пункте 3.2 работы схема отражает строго установленное пространственное расположение тектонических дислокаций БСЗ и Монголо-Охотской шовной зоны на дневной поверхности. Именно наличие строго зафиксированного положения разрывных нарушений в плане позволяет проводить моделирование их вертикального распределения.

Принципы и методология моделирования вертикального распределения подробно изложены в Главах 1 и 2 данной работы. В данной главе приводится описание результатов исследований в полосовой зоне опорного геофизического профиля «З-ДВ», расположение которого приведено на рисунке 32.

Учитывая пространственную связь БСЗ и Монголо-Охотской шовной зоны, представляется чрезвычайно интересным проведение комплексного изучения и сопоставления основных параметров глубинной морфологии этих геоструктур.

Результаты сейсморазведочных исследований

На сейсмическом разрезе МОВ-ОГТ в показателях рефлексивности отмечается высокая степень неоднородности верхней коры, которая проявляется в форме чередования субгоризонтальных ареалов сгущения рефлекторов и сейсмически прозрачных зон. На сейсмических разрезах выделяются преимущественно вертикальные и слабо наклонные рефлекторы.

Высокая степень неоднородности земной коры проявляется и на более глубоких горизонтах. Вплоть до границы Мохоровичича фиксируется мозаичная картина распределения ареалов сгущения рефлекторов, разделенных сейсмически прозрачными зонами. Граница кора/мантия трассируется на глубинах 43-45 км по подошве нижнекорового высокорелективного слоя.

Характерной особенностью сейсмического разреза МОВ-ОГТ «З-ДВ» в показателях рефлексивности является выделение в пределах верхней коры субгоризонтальных пачек, формирующих фрагментарно проявленный высокорелективный слой. Средняя мощность этого слоя составляет 3-4 км и относительно выдержана под всей Байкало-Становой сдвиговой зоной. Глубина его залегания варьирует в пределах от 9 до 17 км. На интервале 320-330 км профиля «З-ДВ» отмечается его куполообразная форма с максимальным приближением к дневной поверхности в районе развития главного шва и его оперения (Рисунок 37).

Второй высокорелективный слой картируется на среднекоровых глубинах (около 30 км). Наиболее интенсивнее он проявлен в юго-западной части земной коры БСЗ (230-300 км интервал профиля «З-ДВ»). После 350 км разреза этот слой не прослеживается.

Байкало-Становая сдвиговая зона

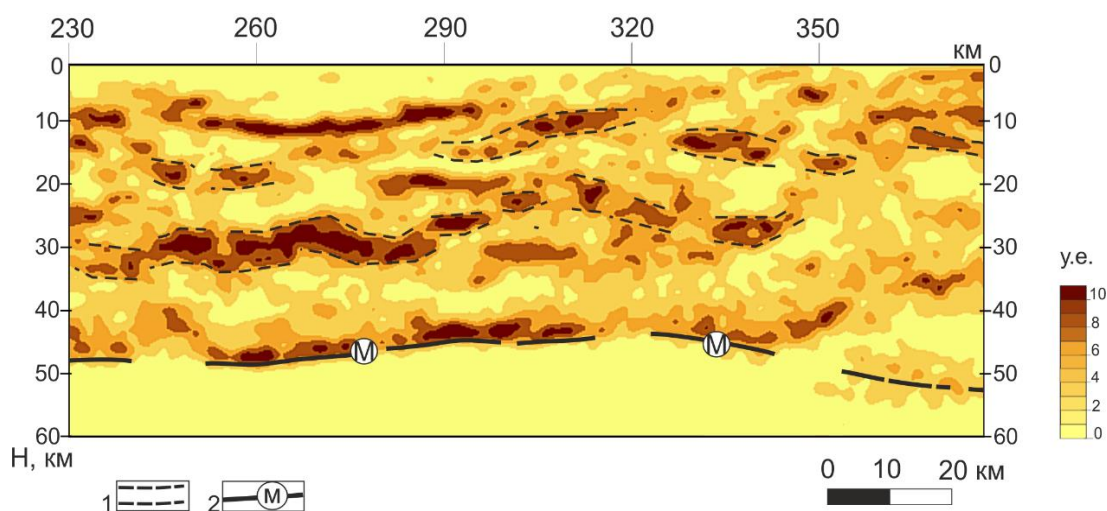


Рисунок 37 Трассирование верхнекоровых тектонических дислокаций БСЗ в сечении геотраверса профиля «З-ДВ». Сейсмический разрез в показателях рефлексивности получен с использованием материалов ЦГГФ ФГБУ «ВСЕГЕИ»

Условные обозначения: 1 – границы наиболее контрастных слоев повышенной рефлексивности; 2 – предполагаемое положение границы Мохоровичича.

Результаты решения обратной задачи теории потенциала.

На глубинных моделях, рассчитанных с использованием алгоритма «томографии потенциальных полей» неоднородная верхняя кора характеризуется вариацией величин плотностей в пределах от 2.6 до 2.8 г/см³ и эффективной намагниченностью от -8 до 6 мА/м. На большей части рассматриваемого сечения отмечается относительно однотипное нарастание плотности с глубиной, за исключением области между 290 и 340 км профиля. Эта зона развития главного шва и оперяющих дислокаций БСЗ характеризуется отчетливым изменением инфраструктуры поля (Рисунок 38). При этом нижние горизонты земной коры характеризуются относительно однородной структурой псевдоплотностного разреза.

На разрезе эффективной намагниченности не фиксируется контрастного проявления Байкало-Становой зоны (Рисунок 39).

Байкало-Становая сдвиговая зона

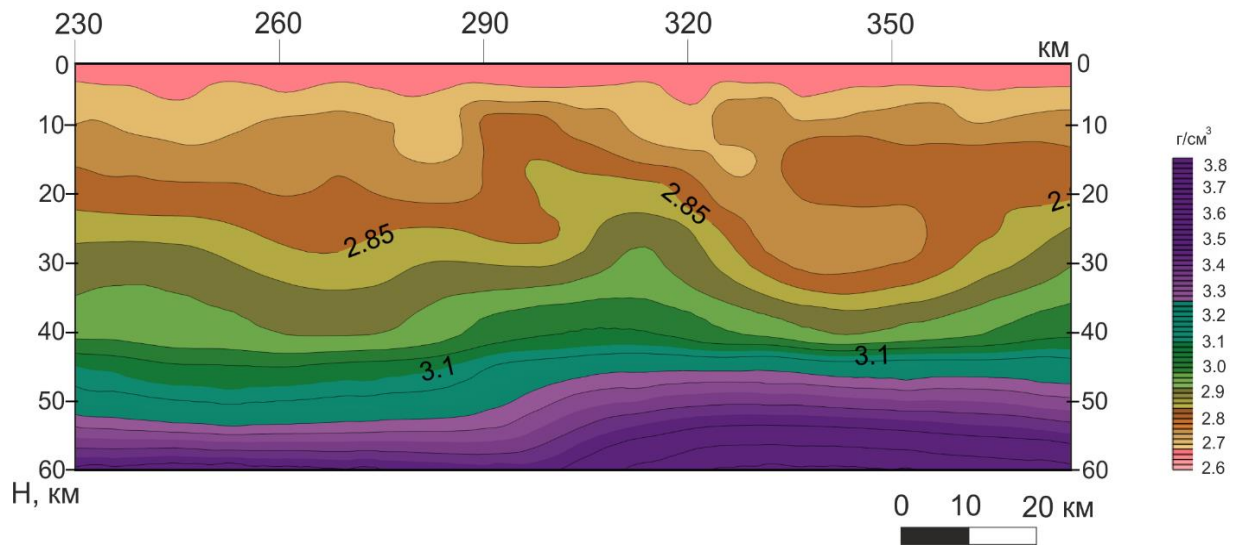


Рисунок 38 Псевдоплотностной разрез земной коры Байкало-Становой сдвиговой зоны в сечении геотраверса «З-ДВ»

Байкало-Становая сдвиговая зона

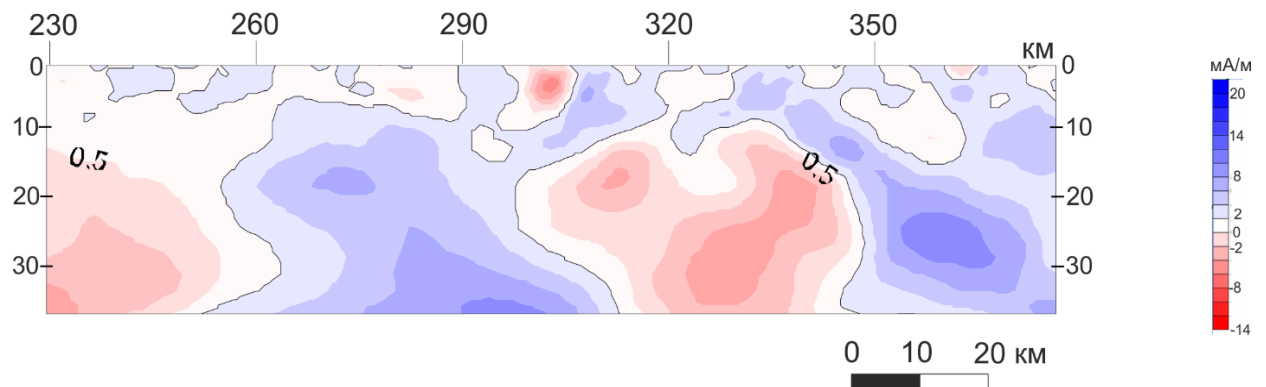


Рисунок 39 Разрез «эффективной намагниченности» земной коры Байкало-Становой сдвиговой зоны в сечении геотраверса «З-ДВ»

Результаты сейсмологических исследований.

В ходе анализа пространственного распределения очагов землетрясений в земной коре в выборку, по аналогии с авторскими исследованиями в полосе профиля «З-ДВ», включались очаги, расстояние до которых от профиля не превышало 10 км (Рисунок 40). В ходе операций по выборке и вынесении землетрясений на разрез использовались аналогичные предыдущим исследованиям сейсмологические каталоги. Погрешности определения координат и глубины гипоцентра находятся в тех же пределах, обозначенных при исследованиях в полосе профиля «З-ДВ».

Байкало-Становая сдвиговая зона

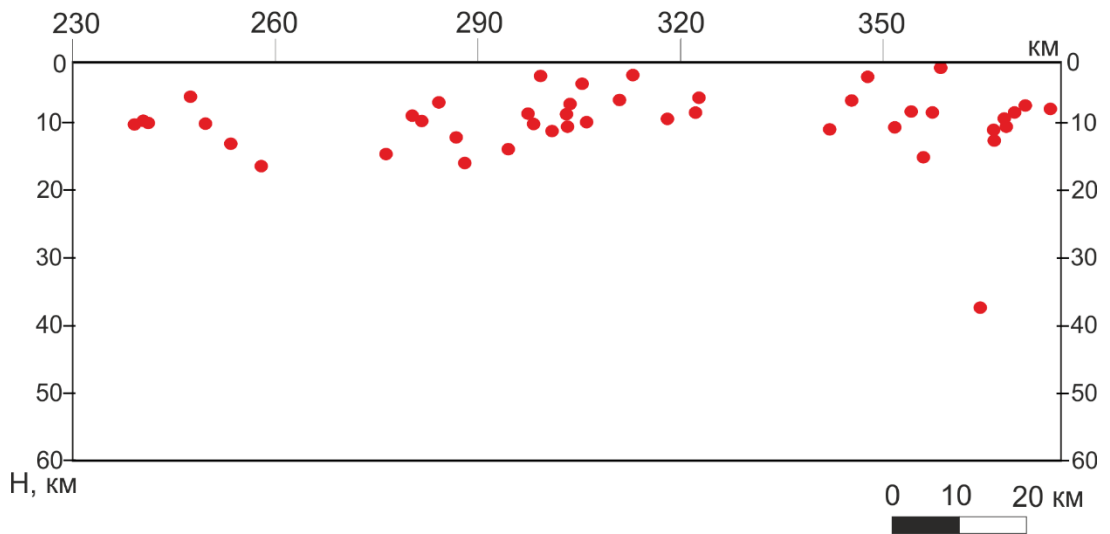


Рисунок 40 Проекция очагов землетрясений на сечение геотраверса 3-ДВ (максимальные удаления очагов до 10 км от профиля)

Результаты анализа пространственного распределения очагов землетрясений свидетельствуют о том, что большая часть сейсмических событий локализуется в пределах верхней коры. Суммарная мощность зоны верхнекоровых землетрясений здесь составляет до 18 км. Средняя-нижняя кора слабо сейсмична: в области развития Байкало-Становой сдвиговой зоны в рассматриваемый период времени в сечении профиля зафиксирован только единичный очаг, расположенный на глубинах более 30 км.

Результаты реологического моделирования

Как было показано в Главе 1, специализированное реологическое моделирование в пределах области развития Байкало-Становой сдвиговой зоны не проводилось. В связи с этим, автором проводится анализ зависимости прочности породы от глубины залегания на основании реологических моделей, разработанных зарубежными коллегами для Центральной Европы и запада Северной Америки (приведены в Главе 1).

Результаты комплексной интерпретации геолого-геофизических данных

Принципы моделирования структурно-вещественных неоднородностей в вертикальном измерении, как и при проведении аналогичной операции в сечении профиля «3-ДВ», основывались на взаимном анализе расположения наклонных рефлекторов и очагов сейсмичности, с привлечением результатов анализа расположения зон максимальных градиентов на глубинных моделях, полученных в результате решения обратной задачи теории потенциала.

Результаты комплексной интерпретации геофизических, сейсмологических данных и результатов реологического моделирования свидетельствуют о том, что наибольшее количество структурно-вещественных неоднородностей локализуется в верхней хрупкой коре сдвиговой зоны (Рисунок 41). Установлено, что закартированные на дневной поверхности тектонические нарушения имеют листрический характер. Увеличение углов падения последних наблюдается при приближении к высокорекрефлексивной зоне, локализованной в базальной части верхней коры. Уверенная трассировка тектонических дислокаций возможна до глубин 10-17 км.

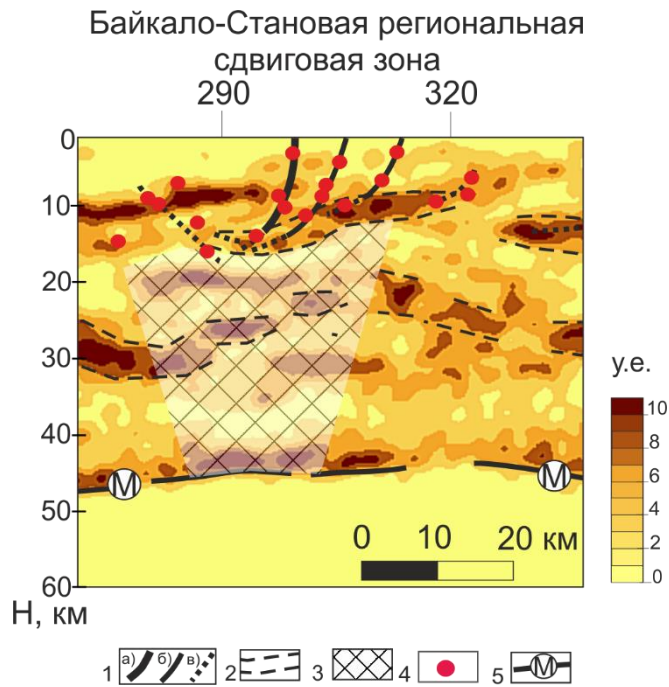


Рисунок 41 Схематическая модель глубинного строения БСЗ в сечении геотраверса «3-ДВ». Сейсмический разрез в показателях рекрефлексивности получен с использованием материалов ЦГГФ ФГБУ «ВСЕГЕИ»

Условные обозначения: 1 – тектонические дислокации: главный шов (а) и второстепенные дислокации (б), закартированные на поверхности и уверенно прослеженные в разрезе верхней коры по сейсмическим и сейсмологическим данным, в – предполагаемы только по геофизическим данным; 2 – границы субгоризонтальных высокорекрефлексивных слоев; 3 – предполагаемое по косвенным признакам расположение глубинного канала Байкало-Становой сдвиговой зоны; 4 – очаги землетрясений; 4 – предполагаемое положение границы Мохоровичича.

Выделенный автором и прослеженный в сечении профиля «3-ДВ» субгоризонтальный высокорекрефлексивный слой на глубинах 10-17 км отделяет наиболее хрупкую часть коры, в пределах которой локализуется большая часть дислокаций, картируемых на дневной

поверхности. Результаты анализа морфологии тектонических нарушений в верхней коре позволяют предположить их выполаживание в пределах данного высокорекрефлексивного слоя.

На глубинных интервалах средней-нижней коры происходит радикальное снижение уровня сейсмичности. Моделирование разрывных дислокаций БСЗ в сечении средней-нижней коры представляется ненадежным, поскольку отчетливые маркеры их проявления отсутствуют, и решение задачи их моделирования становится многовариантным. Вследствие этого, автором предлагается не трассировать отдельные разломы, а наметить положение зоны, в пределах которой с наибольшей вероятностью, учитывая форму доминантного разлома в верхней коре и распределение рекрефлексивности, локализуется глубинный канал сдвиговой зоны.

Установить физическую природу и тектоническую роль выделенных субгоризонтальных высокорекрефлексивных зон позволяют результаты реологического моделирования. Приведенный в главе 1 анализ реологической модели земной коры свидетельствует о том, что на глубинах 10-17 км и 20-30 км при величине теплового потока 60 мВт/м^2 развиваются слои хрупко-пластичного перехода (ХПП). Учитывая тот факт, что одним из наиболее показательных индикаторов слоя ХПП являются максимально установленные глубины подавляющего количества землетрясений, верхнекоровый высокорекрефлексивный субгоризонтальный слой зоны БСЗ интерпретируется автором как слой хрупко-пластичного перехода в земной коре.

Таким образом, в ходе комплексных исследований глубинного строения земной коры Байкало-Становой региональной сдвиговой зоны была установлена ее многослойность. Первым структурным этажом является высоко неоднородная хрупкая верхняя кора. В ее пределах локализуется подавляющее количество тектонических дислокаций, контрастно маркируемых цепочками землетрясений и наклонными рефлекторами. Вторым структурным этажом является слой хрупко-пластичного перехода, в пределах которого выполаживаются тектонические дислокации верхней коры. Здесь происходит падение прочностных свойств пород и увеличение доли упруго-вязких деформаций. Глубина развития этой субгоризонтальной зоны 9-16 км, мощность составляет 3-5 км. Горизонты средней-нижней коры характеризуются отсутствием сейсмичности и развитием на глубинах 20-30 км аналогичной высокорекрефлексивной зоны. Последняя по результатам реологического моделирования, возможно, также маркирует слой хрупко-пластичного перехода. Отсутствие отчетливых сейсмологических индикаторов, подтверждающих вышесказанное не позволяет обосновать это предположение.

3.5 Моделирование структурно-вещественных неоднородностей земной коры Монголо-Охотской зоны в вертикальном измерении

Монголо-Охотская шовная зона развивается субпараллельно БСЗ и сочленяется с последней по системе сдвиговых дислокаций (см. рисунок 34). Для изучения особенностей

глубинного строения Монголо-Охотской шовной зоны автором было проведено моделирование вертикального распределения структурно-вещественных неоднородностей земной коры в сечении профиля «З-ДВ». Методология выполненных операций не отличалась от таковых и описанных выше для БСЗ. Основой при моделировании выступали геофизические и сейсмологические данные, полученные из сформированного фактологического банка данных (глубинный сейсмический разрез МОВ-ОГТ в показателях рефлексивности; глубинный скоростной разрез ГСЗ; модели, отражающие распределение эффективной плотности и намагниченности земной коры; данные о пространственном распределении очагов землетрясений).

Подавляющее число откартированных на дневной поверхности разрывных нарушений закономерно локализуется в пределах верхней хрупкой коры. Листрические разломы прослежены до зоны хрупко-пластического перехода с учетом морфологии высоко и низко-рефлективных наклонных пачек разреза МОВ-ОГТ и цепочек очагов землетрясений (Рисунок 42).

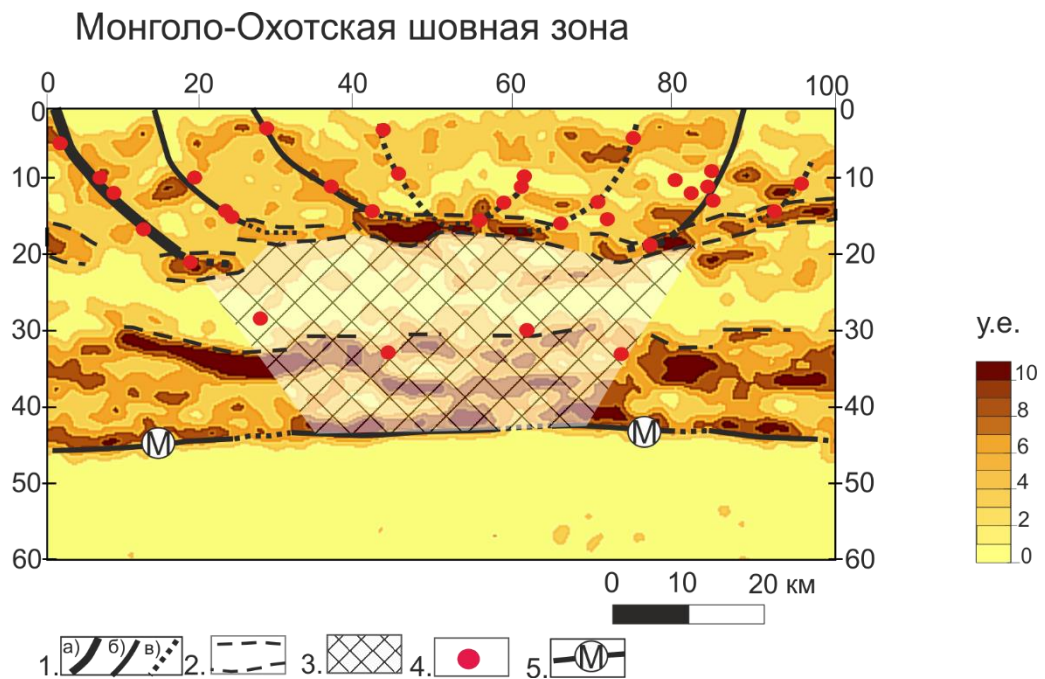


Рисунок 42 Схематическая модель глубинного строения земной коры БСЗ в сечении геотраверса «З-ДВ». Сейсмический разрез в показателях рефлексивности получен с использованием материалов ЦГГФ ФГБУ «ВСЕГЕИ»

Условные обозначения: 1 – разрывные нарушения: а – главные разломы, б – второстепенные, в – предполагаемые; 2 – субгоризонтальные высокореклексивные слои; 3 – ареал возможной локализации глубинного канала зоны; 4 – очаги землетрясений; 4 – предполагаемое положение границы Мохоровичича

Характерной особенностью глубинной морфологии тектонических дислокаций является их листрический характер. Их подавляющее количество локализуется в пределах хрупкой верхней коры и значительно снижается в ее базальной части. На этих глубинах (13-21 км) на сейсмическом разрезе картируется субгоризонтальный высокореклефтивный слой, мощность которого составляет 3-4 км. Анализ листрических разрывных нарушений позволяет предположить их выполаживание в пределах данного субгоризонтального слоя. На глубинных моделях распределения абсолютных плотностей и эффективной намагниченности на этом интервале глубин наблюдается зона максимальных градиентов. Геометрия этих зон приближенно повторяет морфологию высокореклефтивного слоя. Необходимо отметить, что сопоставление расположения волноводов по данным ГСЗ в земной коре и положения высокореклефтивного слоя на разрезе МОВ-ОГТ свидетельствуют о том, что к подошве последнего приурочены домены, характеризующиеся инверсией сейсмических скоростей.

Результаты реологического моделирования и распределение очагов землетрясений в земной коре позволяют интерпретировать выделенный субгоризонтальный высокореклефтивный слой как зону хрупко-пластичного перехода.

Земная кора, располагающаяся гипсометрически ниже слоя ХПП (глубины 20-30 км) характеризуется сейсмической прозрачностью и слабой сейсмичностью. Количество отражающих площадок повышается только вблизи границы Мохоровича. Однако в отсутствии совокупности отчетливых индикаторов тектонических нарушений представляется невозможным проведение операций глубинного моделирования последних. Автором намечается ареал, в пределах которого наиболее вероятно развивается глубинный канал сдвиговой зоны.

Выводы

Результаты проведенных комплексных исследований свидетельствуют о том, что Байкало-Становая региональная сдвиговая зона характеризуется фрагментарно прослеживаемым в плане главным швом и высокоразвитой сетью оперяющих дислокаций, которые выступают в роли тектонических «перемычек» между отдельными сегментами магистрального шва. Сдвиговая зона имеет в плане изогнутую морфологию и в области своего наибольшего изгиба пространственно сочленяется по системе оперяющих и второстепенных разломов с развивающейся параллельно Монголо-Охотской шовной зоной более древнего возраста. В разрезе этих разновозрастных геоструктур выделяется хрупкая высокосейсмичная верхняя кора, к которой приурочены многочисленные разрывные листрические дислокации. Выполаживание последних происходит в слое хрупко-пластичного перехода в базальной части верхней коры. Данный слой отчетливо проявляется по результатам сейморазведочных, сейсмологических и реологических исследований.

Картирование глубинного канала сдвиговых зон является дискуссионным, так как отчетливые маркеры его наличия в пределах средней-нижней коры отсутствуют. Результаты комплексных исследований позволяют лишь наметить наиболее вероятный ареал развития глубинного канала геоструктур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика комплексного исследования глубинного строения Байкало-Становой сдвиговой зоны позволила оценить характер деструкции земной коры в латеральном и вертикальном измерениях. В ходе комплексных исследований был откартирован главный разлом геоструктуры, который фрагментарно трассируется на протяжении всей сдвиговой зоны (от оз. Байкал до побережья Охотского моря) и характеризуется наличием многочисленных оперяющих и второстепенных дислокаций. Совместный анализ механизмов очагов землетрясений и результатов тектонофизических исследований позволяют интерпретировать БСЗ как региональный левосторонний сдвиг.

Результаты выполненного предметного анализа комплексных исследований в пределах крупнейших сдвиговых зон Мира (Сан Андреас, Верхнерейнский грабен) и материалы аналогичных авторских исследований в пределах сдвиговых зон Дальнего Востока России свидетельствуют о том, что принципиальную структурно-формирующую роль в глубинном строении этих геоструктур играет субгоризонтальная зона хрупко-пластичного перехода (ХПП), на которую замыкаются многочисленные листрические дислокации. Последние локализуются в основном в пределах верхней хрупкой коры и отчетливо маркируются геофизическими и сейсмологическими данными. Именно присутствие хрупких деформаций обуславливает высокий уровень сейсмичности верхней коры. Увеличение доли упруго-вязких деформаций и неспособность аккумулировать тектонические напряжения вдоль осевых зон разломов отчетливо отражается при переходе к слою ХПП. Сейсмичность на этих глубинных горизонтах резко снижается. Выделенный по сейсморазведочным, сейсмологическим и реологическим данным слой хрупко-пластичного перехода характеризуется выдержанной мощностью (3-5 км) и приурочен к подошве верхней коры.

Весьма сложной является задача картирования глубинного канала Байкало-Становой сдвиговой зоны. Отсутствие отчетливых маркеров его наличия (цепочки очагов землетрясений, рефлекторы) не позволяет делать какие-либо научно-теоретические заключения. Необходимо отметить, что некоторые исследователи уделяют повышенное внимание слою хрупко-пластичного перехода и предполагают возможность латерального смещения глубинного канала по этой зоне ослабленных пород. Детальное исследование физической природы и тектонической роли выделенного слоя ХПП является задачей дальнейших специализированных научно-теоретических исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Агеев А.С.** Особенности глубинного строения и проявление в геофизических полях региональных сдвиговых границ. Сравнение основных параметров морфологии региональных высокосейсмичных сдвиговых зон Сан-Андреас и Байкало-Становой // Геофизические методы исследования Земли и ее недр. 2016. С. 3–10. DOI: 10.13140/RG.2.1.2247.5764
2. **Агеев А.С.** Зонально-блоковое строение Байкало-Становой складчатой области по данным комплексных геофизических исследований в створе профиля 3-ДВ южный участок. /А.С. Агеев, А.Г. Лобашова, А.С. Егоров/ Материалы V Международной конференции молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского (28 февраля – 3 марта 2017 г., ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург) [Электронный ресурс] / Минприроды России, Роснедра, ВСЕГЕИ. – Электрон. данные. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2017. – 1 оптич. диск (DVD-ROM)
3. **Агеев А.С.** Структурно-вещественные неоднородности земной коры в пределах региональных сдвиговых зон по результатам комплексной интерпретации геолого-геофизических данных /А.С. Агеев, А.С. Егоров/ тез. докл. L (50-е) юбилейное тектоническое совещание «Проблемы тектоники и геодинамики земной коры и мантии». Том 2. Материалы L Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2018. С. 359-363.
4. **Агеев А.С.** Морфология сдвиговых дислокаций неоген-антропогенного возраста Байкало-Становой региональной сдвиговой зоны / А.С. Агеев, А.С. Егоров/ Естественные и технические науки, 2017 а) - №4 – С. 47-51
5. **Агеев А.С.** Особенности глубинного строения Байкало-Становой региональной сдвиговой зоны по геологическим, геофизическим и дистанционным данным в створе профиля 3ДВ (южный участок) / А.С. Агеев, А.С. Егоров / Региональная геология и металлогения, 2017 б) - №70 – С.36-40
6. **Агеев А.С.** Основные черты глубинной морфологии Байкало-Становой тектонической зоны по результатам интерпретации геолого-геофизических материалов / А.С. Агеев, А.С. Егоров / Региональная геология и металлогения, 2018 - №73 – С. 19-23
7. **Алексеев С.Г.** Особенности геологической интерпретации результатов гравиразведки и магниторазведки / С.Г.Алексеев, С.А Козлов, М.Б Штокаленко // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных,

- магнитных и электрических полей: Материалы 37-й сессии Междунар. науч.семинара им. Д.Г.Успенского. М.: ИФЗ РАН, 2010.
8. **Алексеев С.Г** Достоинства и недостатки томографии потенциальных полей /С.Г. Алексеев, Н.П. Сенчина, С.Ю. Шаткевич, М.Б. Штокаленко / Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 43-й сессии Междунар. науч. семинара им. Д.Г.Успенского. Воронеж: ООО ИПЦ «Научная книга», 2016. С. 10-13.
 9. **Алексеев С.Г** Обоснование адекватности томографии потенциальных полей /С.Г. Алексеев, Н.П. Сенчина, С.Ю. Шаткевич, М.Б. Штокаленко, И.Б. Мовчан / Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 44-й сессии Междунар. науч. семинара им. Д.Г.Успенского Москва 23-27 января 2017 г. М: ИФЗ РАН. 2017. С 21-26.
 10. **Бачманов Д.М.** База данных активных разломов Евразии / Д.М. Бачманов, А.И. Кожурин, В.Г. Трифонов / Геодинамика и тектонофизика, 2017, Т. 8 - № 4 - С. 711-736
 11. **Гледко Ю. А.** Гидрогеология // Учебное пособие. Высшая школа, Минск, 2012 (электронный ресурс).
 12. Гидрогеология СССР. Т. XIX, XX, XXII. – М.: Недра, 1970
 13. **Дучков А.Д.** Тепловой поток Сибири / А.Д. Дучков, Л.С. Соколова/ Материалы Всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Пузырева. Новосибирск, 2014 – С. 211-216
 14. **Егоров А.С.** Глубинное строение и геодинамика литосферы Северной Евразии (по результатам геолого-геофизического моделирования вдоль геотравверсов России) //СПб: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. 200 с.
 15. **Имаев В.С.** Сейсмотектоника Олекмо-Становой сейсмической зоны (Южная Якутия) /В.С. Имаев, Л.П. Имаева, Б.М. Козьмин / Литосфера, 2005 - №2 – С.21-40
 16. **Имаев В.С.** Карта сейсмотектоники Восточной Сибири /В.С. Имаев, Л.П. Имаева, О.П. Смекалин, Б.М. Козьмин, Н.Н. Гриб, А.В. Чипизубов/ Geodynamics and Tectonophysics, 2016 – V.6, №3 – pp. 276 – 287
 17. **Кирсанов А.А.** Создание Атласа сводных карт для территории России/ А.А. Кирсанов, Т.П. Литвинова, Г.М. Беляев, Ю.Ю. Юрченко / Известия ВСЕГЕИ 2006. Т. 6 (54). СПб: ВСЕГЕИ, 2008. С. 48-60.
 18. Кольская сверхглубокая / гл. ред. Е.А. Козловский – М.: Недра, 1984. – 492 с.

19. Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследований / гл. ред. В.П. Орлов и Н.П. Лаверов –М., 1998. – 261с.
20. **Кузьмин Ю.О.** Особенности структурного дешифрирования линеаментов с учетом современной геодинамики разломов /Ю.О. Кузьмин, А.И. Никонов, Е.С. Шаповалова/ Георесурсы. Геоэнергетика. Геополитика, 2016. - №13 – С. 1-21
21. **Леонов М.Г.** Тектоника континентального фундамента и вертикальная аккреция консолидированной земной коры // Фундаментальные проблемы общей тектоники. М.: Научный мир, 2001. - С. 91-154
22. **Леонов М.Г.** Тектоника консолидированной коры. М.: Наука, 2008. – 460 с.
23. **Лопатин Д.В.** Карта рудоносных структур СССР масштаба 1: 5 000 000 по данным дистанционных съемок // Принципы и методика дистанционных исследований при прогнозировании твердых полезных ископаемых. СПб., ВСЕГЕИ, 1992.- С. 22-27
24. **Лукьянов А.В.** Пластические деформации и тектоническое течение горных пород в литосфере // Тектоническая расслоенность литосферы. М., 1980. – С. 105-146
25. **Лукьянов А.В.** Пластические деформации и тектоническое течение в литосфере. М.: Наука, 1991. – 143с.
26. **Лунина О.В.** Новая электронная карта активных разломов юга Восточной Сибири / О.В. Лунина, А.С. Гладков, П.П. Шерстянкин/ Доклады РАН. – 2010. – Т. 433. – № 5. С. 662–667.
27. **Паталаха Е.И.** Тектонические поток как основа понимания геологических структур /Е.И. Паталаха, А.И. Лукиенко, В.В. Гончар. - Киев: Издание Нац. АН Украины, 1995. - 159 с.
28. **Романюк Т.В.** Реологическая модель и особенности напряженно-деформированного состояния региона активной сдвиговой разломной зоны на примере разлома Сан-Андреас. Статья 1. Разлом Сан-Андреас как тектонофизическая структура / Т.В. Романюк, А.Н. Власов, М.Г. Мнушкин, А.В. Михайлова, Н.А. Марчук/ МОИП, отд. Геологич. - 2013а. - Т.88. - Вып. 1. - С. 3-19.
29. **Романюк Т.В.** Реологическая модель и особенности напряженно-деформированного состояния региона активной сдвиговой разломной зоны на примере разлома Сан-Андреас. Статья 2. Тектоно-физическая модель литосферы региона разлома Сан-Андреас / Т.В. Романюк, А.Н. Власов, М.Г. Мнушкин, А.В. Михайлова, Н.А. Марчук / МОИП, отд. Геологич. - 2013б). - Т.88. - Вып. 2. - С. 3-21.

30. **Семинский К.Ж.** Внутренняя структура континентальных разрывных зон: тектонофизический аспект / К.Ж. Семинский. - Новосибирск: Изд-во «ГЕО». 2003. - 244 с.
31. **Трифонов В.Г.** Карта активных разломов СССР и сопредельных территорий (с объяснительной запиской на рус. и англ. яз., 50 с.) / В.Г. Трифонов, К.Г. Леви, Н.В. Лукина, В.И. Макаров, А.И. Кожурин, С.С. Шульц-мл.- Иркутск-М.: ГУГК, ГИН АН СССР. 1987. – 50 с.
32. Космогеологическая карта линейных и кольцевых структур территории СССР. Масштаб 1: 5 000 000 / гл. Ред. А.Д. Щеклов. М., Мингео СССР. – 1980.
33. **Ageev A.S.** Features of the deep structure and expression in geophysical fields regional shift boundaries. Comparison of the main morphology parameters of the San Andreas and Baikal-Stanovaya strike-slip zones // 67th Berg- und Huttenmannischer Tag 2016. - Freiberg. 2016. - С. 40-45.
34. **Barka, A.,** (1988), Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity /A. Barka, and K. Kadinsky-Cade// Tectonics, 7, 663–684, DOI:10.1029/TC007i003p00663.
35. **Barka, A.** (1996) Slip distribution along the North Anatolian fault associated with the large earthquakes of the period 1939 to 1967. - Bull. Seismol. Soc. Am. V. 86. – pp. 1238–1254
36. **Barka, A.,** et al. The surface rupture and slip distribution of the 17 August 1999 Izmit earthquake (M 7.4), North Anatolian fault, 2002. - Bull. Seismol. Soc. Am., V. 92. – pp. 43–60, DOI: 10.1785/0120000841.
37. **Becken M.** Magnetotelluric Studies at the San Andreas Fault Zone: Implications for the Role of Fluids / M. Becken, O. Ritter//Surveys in Geophysics, 2012. V.33. – pp.65-105
38. **Brocher T.M.** Seismic evidence for a lower-crustal detachment beneath San Francisco Bay, California / T.M. Brocher, J. McCarthy, P.E. Hart, W.S. Holbrook, K.P. Furlong, T.V. McEvilly //1994. - Science V.265. - №5177.- pp. 1436-1439
39. **Buness H.** Seismic exploration of deep hydrothermal reservoirs in Germany /H. Buness, H. Hartmann, H.M. Rumpel, T. Beilecke, P. Musmann, R. Shulz // Materials of The Proceeding World Geothermal Congress. – 2010. – Bali, Indonesia 25-29 April. – 5 p.
40. **Burgmann R.** Rheology of the lower crust and upper mantle: Evidence from rock mechanics, geodesy and field observations / R.Burgmann, G. Dresen // 2008. – Annual Review of Earth and Planetary Sciences. – V. 36, №1.– pp.531-561
41. **Byerlee, J.** PAGEOPH 1978 V.116. - № 615. URL: <https://doi.org/10.1007/BF00876528>

42. **Campos-Enriquez J.O.** Gravity and magnetic constraints on deep and intermediate crustal structure and evolution models for the Rhine Graben / J. O. Campos-Enriquez, P. Hurbal, F. Wenzel, E. Lueschen, L. Meier // *Tectonophysics* 1992. – V. 206. – pp. 113-135
43. **Cloetingh S.** Thermomechanical structure of European continental lithosphere: constraints from geological profiles and EET estimates / S. Cloetingh, E. Burov // *Geophysics Journal International*, 1996. – V. 124. – pp. 695-723
44. **Domenico S. N.** Detail gravity profile across San Andreas Fault ZONE/ *GEOPHYSICS*, 1967. – V.32. - №2. – pp. 297-301. DOI: 10.1190/1.1439868
45. **Dragoni M.** Depth of the brittle-ductile transition in a transcurrent boundary zone / M. Dragoni, S. Pondrelli // *PAGEOPH*, 1991. – V.135, №3. – pp. 448-461
46. **Dragoni M.** The brittle-ductile transition in tectonic boundary zones / *Annali di geofisica*, 1993. - V. 36, №2. – pp. 37-44
47. **Freyermark J.** The deep thermal field of the Upper Rhine Graben / J. Freyermark, J. Sippel, M. Scheck-Wenderoth, K. Bär, M. Stiller, J. Fritsche, M. Kracht // *Tectonophysics*, 2017. – V. 694. – pp. 114-129
48. **Fuis, G. S.** A comparison between the transpressional plate boundaries of the South Island, New Zealand, and southern California, USA: The Alpine and San Andreas fault systems, in *A Continental Plate Boundary: Tectonics at South Island, New Zealand* /G.S. Fuis, M. D. Kohler, M. Scherwath, U. ten Brink, H. J. A. Van Avendonk, and J. M. Murphy. Editors: D. Okaya, T. Stern, and F. Davey // *American Geophysical Union Monograph*, 2007. - V. 175. – pp. 307–327. DOI: 10.1029/175GM16.
49. **Hadley D.** Seismic structure of the Transverse Ranges, California / D. Hadley, H. Kanamori // *GSA Bulletin*, 1977. – V. 88, №10. – pp. 1469 – 1478
50. **Haimberger R.** High-resolution seismic survey on the Rhine river in the northern Upper Rhine Graben / R. Haimberger, A. Hoppe, A. Schafer // *International journal of Earth Science*, 2005. – V.94. – pp. 657-668. DOI: 10.1007/s00531-005-0514-z
51. **Hobbs, W.H.** Lineaments of the Atlantic border region / *Geological Society of America Bulletin*, 1904. V.15. – pp. 483–506
52. **Hole J.A.** Nonlinear high-resolution three dimensional seismic travel time tomography / *Journal of Geophysical Research*, 1992. V. 97, № B5. – pp. 6553-6562
53. **Holbrook W. S.** Crustal structure of a transform plate boundary: San Francisco Bay and the central California continental margin / W. S. Holbrook, T.M. Brocher, U. S. ten Brink, J.A. Hole // *Journal of Geophysical Research*, 1996. V. 101, №B10. – pp. 22311 – 22334

54. **Jones D.L.** Neogene transpressive evolution of the California Coast Ranges/ D. L. Jones, R. Graymer, C. Wang, T. V. McEvilly, A. Lomax // *Tectonics*, 1994. V. 13, №2. – pp. 561 – 574
55. **Kirby, S.H** Mantle phase changes and deep-earthquake faulting in subducting lithosphere /S.H. Kirby, W.B. Durham, L.A. Stern// *Science*, 1991. - V.252. – pp. 216-224.
56. **Kohlstedt, D.L.** Strength of the lithosphere: Constraints imposed by laboratory experiments / D.L. Kohlstedt, B. Evans, S.J. Macwell// *Journal of Geophysical Research*, 1995. - V. 100, - №. B9 – pp. 216-224.
57. **Wooley, R. J.** A Gravity Data Along LARSE (Los Angeles Regional Seismic Experiment) Line 2, Southern California/ R.J. Wooley, V. E. Langenheim// U.S. Geological Survey Open-File Report 01-375. – P. 22. – URL: <https://pubs.usgs.gov/of/2001/0375/>.
58. **Langenheim V.E.** Fault geometry and cumulative offsets in the central Coast Ranges, California: Evidence for northward increasing slip along the San Gregorio–San Simeon–Hosgri fault / V.E. Langenheim R.C. Jachens R.W. Graymer J.P. Colgan C.M. Wentworth R.G. Stanley// *Lithosphere*, 2013. – V. 5, № 1. – pp. 29-48.
59. **Langenheim V.E.** Subsurface Geometry of the San Andreas Fault in Southern California: Results from the Salton Seismic Imaging Project (SSIP) and Strong Ground Motion Expectations / G. S. Fuis, K. Bauer, M. R. Goldman, et al.// *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2017. – V. 107, № 4. – pp. 1642-1662
60. **Leydecker G.** Earthquake catalog for the Federal Republic of Germany with border areas for the years 800-2004 / Federal Institute for Geosciences and Natural Resources BGR, Hanover, 2005
61. **Hill M.** San Andreas, Garlock, and Big Pine faults, California. A study of the character, history and tectonic significance of their displacements / M. Hill, T.W. Dibble // *Bulletin of the geological society of America*, 1953. – V. 64. – pp. 443-468
62. **Mackie R.L.** Magnetotelluric investigation of the San Andreas fault at Carrizo Plain, California / R.L. Mackie, D. W. Livelybrookes, T. R. Madden, J. C. Larsen// *Geophysical research letters*, 1997. – V. 24, № 15. – pp. 1847-1850.
63. **Mayer G.** The deep crust of the Southern Rhine Graben: reflectivity and seismicity as images of dynamic processes / G. Mayer, P.M. Mai et al.// *Tectonophysics*, 1997. – V. 275. – pp. 15-40.
64. **Meissner R.** Crustal viscosities and seismic velocities / R. Meissner, B. Tanner// *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1992. – V. 69. – pp. 252-256.

65. **Mooney W.D.** Coincident Seismic Reflection/Refraction Studies of the Continental Lithosphere: A Global Review / W.D. Mooney, T. M. Brocher// Reviews of Geophysics, 1987. – V. 25. – pp. 723-742.
66. **Movchan I.B.** Qualitative interpretation of remote sensing materials in environmental and geological problems / I.B. Movchan, A.A. Yakovleva// World Applied Sciences Journal, 2014. – V. 30, №1. – pp. 40-45.
67. **Murphy M.** Detailed P- and S-Wave Velocity Models along the LARSE II Transect, Southern California/ J. M. Murphy, G. S. Fuis, T. Ryberg et al.// Bulletin of the Seismological Society of America, 2010. – V. 100, №6. – pp. 3194-3212.
68. **Plenefisch T.** The stress field in the Rhine Graben area inferred from earthquake focal mechanisms and estimation of frictional parameters/ T. Plenefisch, K. –P. Bonjer// Tectonophysics, 1997. – V. 275. – pp. 71-97.
69. **Rabbel W.** Superdeep vertical seismic profiling at the KTB deep drill hole (Germany): Seismic close-up view of a major thrust zone down to 8/5 km depth / W. Rabbel, T. Beilecke et al.// Journal of Geophysical Research, 2004. – V. 109, №B09309. – pp. 3194-3212.
70. **Rotstein Y.** The Upper Rhine Graben (URG) revisited Miocene transtension and transpression account for the observed first-order structures/ Y. Rotstein, M. Schaming // Tectonics, 2011. – V. 30. – pp. 3194-3212.
71. **Ryan H.F.** Vertical tectonic deformation associated with the San Andreas fault zone offshore of San Francisco, California / H.F. Ryan, T. Parsons, R.W. Sliter// Tectonophysics, 2008. – V. 457. – pp. 209-223.
72. **Wallace R.E.** The San Andreas fault system, California / U.S. Geological Survey Professional Paper 1515, 283 p. URL: <http://pubs.usgs.gov/pp/1988/1434>.
73. **Schumacher M. E.** Upper Rhine Graben: Role of preexisting structures during rift evolution / Tectonics, 2002. – V. 21, №1, 1006.
74. **Shelly D.R.** Precise tremor source locations and amplitude variations along the lower-crustal central San Andreas Fault / D. R. Shelly, J. L. Hardebeck// Geophysical Research Letters, 2010. – V. 37, № L14301.
75. **Shelly D.R.** Tremor reveals stress shadowing, deep postseismic creep, and depth-dependent slip recurrence on the lower-crustal San Andreas fault near Parkfield / D. R. Shelly, K. M. Johnson// Geophysical Research Letters, 2011. – V. 38, № L13312.
76. **Sibson R.H.** Fault zone models, heat flow, and the depth distribution of earthquakes in the continental crust of the United States / Bulletin seism. SOC Am., 1982. – V. 72. – pp. 151-163.

77. **Stephenson R.A.** Some examples and mechanical aspects of continental lithospheric folding / R.A. Stephenson, S.A.P.L. Cloetingh// Tectonophysics, 20081991 – V. 188. – pp. 27-37.
78. **Ugur A.** The use of tilt angle in gravity and magnetic methods / Bulletin of The Mineral Research and Exploration, 2011. – V. 143. – pp. 1-12.
79. **Gwendolyn P.** Tectonic geomorphology of the northern Upper Rhine Graben, Germany/ Global and Planetary Change, 2007. – V. 58. – pp. 310-334.
80. **Wenzel F.** A deep reflection seismic line across the Northern Rhine Graben/ Earth and Planetary Science Letters, 1991. – V. 104. – pp. 140-150.
81. **Zelt C.A.** Three-dimensional seismic refraction tomography: A comparison of two methods applied to data from the Faeroe Basin / Journal of Geophysical Research, 1991. – V. 104. – pp. 140-150.
82. **Zelt C.A.** Three-dimensional seismic refraction tomography: A comparison of two methods applied to data from the Faeroe Basin/ C.A. Zelt, P.J. Barton// Journal of Geophysical Research, 1998. V.103. DOI: 10.1029/97JB03536.
83. **Zhu L.** Crustal structure across the San Andreas Fault, southern California from teleseismic converted waves / Earth and Planetary Science Letters, 2000. - V.179. – pp. 183 – 190.
84. **Ziegler P.A.** European Cenozoic rift system/ Tectonophysics, 1992. - V.208. – pp. 91 – 111.