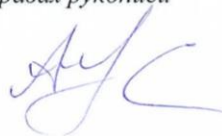


На правах рукописи



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»**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата геолого-минералогических наук

Санкт-Петербург - 2018

Работа выполнена на кафедре геофизических и геохимических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых геологоразведочного факультета Санкт-Петербургского горного университета

**Научный
руководитель:**

Егоров Алексей Сергеевич
доктор геолого-минералогических наук

**Официальные
оппоненты:**

**Пискарев-Васильев Алексей
Лазаревич**
доктор геолого-минералогических наук

Романюк Татьяна Валентиновна
доктор физико-математических наук

Ведущая организация:

**Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский
государственный университет»**

Защита состоится 27 декабря в 15:00 час. На заседании диссертационного совета Д. 212. 121. 04 при ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ-РГГРУ)» по адресу: 117997 Москва ул. Миклухо-Маклая д.23 ауд. 4-73

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просьба отправить по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23 Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, ученому секретарю диссертационного совета Д.212.121.01.

Автореферат разослан «26» октября 2018 г. |

Телефон +7 (495) 433-65-44

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь диссертационного совета
д.г-м.н., доцент



С.Д. Ганова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Изучение 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. 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 на основе предметного анализа опыта 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 исследований глубинного строения крупнейших региональных сдвиговых зон Мира.
- Разработать методику комплексного исследования глубинного строения Байкало-Становой региональной сдвиговой зоны, позволяющую проводить качественную оценку характера и интенсивности деструкции земной коры.
- Оценить параметры и форму современных тектонических нарушений Байкало-Становой и развивающейся параллельно Монголо-Охотской сдвиговых зон.

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 его 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, 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 деформаций. Результаты исследования имеют практическое значение в решении задач геологического картирования и способствуют развитию знаний в области прогноза сейсмических опасностей.

Фактический материал и методы исследования

В основу работы положен обширный фактологический материал в виде разнотипных и разномасштабных геологических, геофизических карт, неотектонических и тектонических схем и картографических основ, сейсмологических данных, полностью покрывающих область развития Байкало-Становой сдвиговой зоны. Принципиальное значение придавалось геофизическим данным в полосовых зонах опорных профилей 1-Сб и 3-ДВ. Фактологический материал был собран, проанализирован и систематизирован автором за время работы в ФГБУ «ВСЕГЕИ».

Основными методами определения пространственного положения тектонических дислокаций на дневной поверхности являлись операции визуального (по характерным особенностям поля) и автоматизированного линеаментного анализа карт потенциальных геофизических полей, их трансформант и космоснимков. Вспомогательными источниками информации являлись данные сейсмологических и геотермических исследований. Тектоническая интерпретация построенных линеаментных схем проводилась в 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.

Моделирование разломов в вертикальных сечениях проводилось с использованием комплекса геофизических, сейсмологических данных и результатов геологического моделирования. Трассирование тектонических нарушений на глубину было обосновано их строгой пространственной привязкой на дневной поверхности. Для выполнения процедуры моделирования заранее были проведены операции пересчета исходного сейсмического разреза в показатели рефлексивности (количество отражающих площадок на единицу разреза), решение обратной задачи теории потенциала, и учет данных магнитотеллурических исследований, вынесение на разрез очагов землетрясений и анализ результатов геологических исследований. Последние позволили с совершенно другой точки зрения подойти к геологической интерпретации фактологического материала.

Личный вклад автора заключается в:

- предметном анализе результатов комплексных исследований глубинного строения крупнейших сдвиговых зон мира и проведения комплексных 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;
- определении 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.

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, 3 статьи представляют основные результаты диссертационного исследования в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России (страницы 23-24).

Структура и объем работы: диссертация состоит из введения, 3 глав заключения и списка литературы; содержит 96 страниц, включая 42 рисунок, 1 таблицу. Список использованных источников содержит 84 наименования. Во **введении** определены цель и задачи исследования; отражается актуальность и степень разработанности этого направления во всем мире и нашей стране, в частности. В **первой главе** приводится описание результатов предметного анализа комплексных исследований глубинного строения земной коры крупнейших и наиболее полно изученных региональных сдвиговых зон мира. Приводится анализ научно-теоретических заключений исследователей этих регионов об особенностях проявления в геофизических полях и закономерностей пространственного распределения тектонических нарушений. Основываясь на опыте выполненных работ в пределах вышеуказанных геоструктур, приводится описание результатов аналогичных авторских исследований для земной коры Байкало-Становой сдвиговой зоны в полосе профиля 1-СБ. Во **второй главе** описывается разработанная автором методика комплексного изучения глубинного строения земной коры региона. Детально описывается весь алгоритм работы с комплексом геолого-геофизических данных. Приводятся фрагменты промежуточных и заключительных результатов при работе с фактологическим материалом. В **третьей главе** приводится описание результатов картирования тектонических нарушений Байкало-Становой зоны на дневной поверхности и моделирования формы последних в вертикальных сечениях профиля 3-ДВ (Южный участок). Наряду с этим, кратко приводятся результаты аналогичных комплексных исследований строения земной коры в пределах Монголо-Охотской шовной зоны, также пересекаемой этим геотраверсом.

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 С.Н. Кашубину, Е.Д. Мильштейн, Т.В. Кашубиной, А.В. Рыбалка, Д.В. Вяткиной, В.В. Клименко, В.С. Львовской 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.

Обоснование защищаемых положений

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.

Тектоническая зона Сан Андреас

Региональная сдвиговая зона (РСЗ) Сан Андреас формирует зону перехода между Тихоокеанской и Северо-Американской литосферными плитами. Эта зона простирается на сотни километров и пересекает в север-северо-западном направлении штат Калифорния - один из самых населенных и экономически значимых в США. Данная структура в научной литературе часто рассматривается как типовая трансформная граница литосферных плит.

По результатам комплексных геолого-геофизических и сейсмологических исследований было установлено зонально-блоковое строение земной коры РСЗ Сан Андреас. Блоки земной коры соответствуют ареалам выдержанных значений

геофизических параметров, в то время как межблоковые структуры маркируются градиентными зонами. В развитой сети тектонических нарушений РСЗ, по которой происходит взаимное тектоническое перемещение литосферных плит и их отдельных сегментов, была выявлена строгая иерархическая система дислокаций, доминирующую роль в которой играет магистральный шов Сан Андреас. Оперяющие дислокации различных морфокинематических типов обширно проявлены вдоль главного шва и особенно развиты на месте его изгиба, в районе которого они пространственно соединяют Сан Андреас со смежными сдвиговыми зонами Уолкер Лэйн и Восточно-Калифорнийской сдвиговой зоной.

Выделенная на дневной поверхности зонально-блоковая структура имеет свое проявление на глубинных горизонтах земной коры. В процессе сопоставления результатов сейсморазведки МОВ-ОГТ, задач инверсии гравитационного и магнитного полей с высокоточными данными о глубинах землетрясений было установлено, что на приповерхностных уровнях (2-3 км) магистральный шов Сан Андреас характеризуется близ вертикальным падением. Его форма на более глубинных горизонтах принимает листрический характер. Уверенная трассировка главного шва проводится до горизонтов 16-18 км, где выделяется субгоризонтальный высокорекфлексивный слой. Исследователями региона он рассматривается как механически ослабленная зона (детачмент), в пределах которой, могут происходить латеральные смещения, как отдельных фрагментов горных пород, так и крупных структурных элементов и даже самого глубинного канала магистрального шва. В связи с высокой неоднозначностью получаемых данных относительно горизонтов нижней коры, наиболее дискуссионным вопросом на сегодняшний день является определение пространственного расположения и формы глубинного канала магистрального шва.

Для оценки тектонической роли выделенного высокорекфлексивного слоя в глубинном строении земной коры было проанализировано распределение очагов землетрясений в сечениях разрезов. Результаты свидетельствуют о том, что мощность сейсмогенной зоны в пределах РСЗ Сан Андреас и смежных систем разломов не превышает 20 км. Было установлено, что значительный контраст сейсмической активности в земной коре объясняется изменением реологических свойств последней в вертикальном измерении. Научно-теоретические заключения

свидетельствуют о том, что переход к упруго-вязким (упруго-пластичным) деформациям происходит в пределах слоя хрупко-пластического перехода (ХПП). Результаты реологического моделирования для земной коры Сан Андреас свидетельствуют о том, что он располагается на глубинах, сопоставимых с положением высокорефлективного слоя.

Тектоническая зона Верхнерейнского грабена

Верхнерейнский грабен (ВРГ) сочетает в себе черты региональной рифтовой зоны и транс-регионального сдвига.

По данным геологических съемок, геофизических исследований потенциальными методами и по материалам дистанционных зондирований в пределах тектонической зоны картируется высокоразвитая сеть тектонических дислокаций. Результаты комплексной интерпретации геофизических данных свидетельствуют о том, что из всего многообразия разрывных нарушений наиболее контрастно проявляются «граничные» разломы. «Граничные» разломы картируются на протяжении более чем 200 км вдоль бортов грабена и отделяют его внутреннюю структуру от внешних, смежных блоков земной коры.

Для изучения глубинной морфологии «граничных» разломов автором был выполнен аналогичный с Сан Андреас комплекс работ, включающий: анализ инфраструктуры сейсмического разреза в показателях рефлексивности вдоль профиля ECORS/DEKORP (Mayer, 1997); анализ результатов реологического моделирования земной коры региона; анализ распределения по глубине очагов землетрясений, зарегистрированных в 10-километровой полосовой зоне геотраверса; анализ инверсионных моделей потенциальных полей, полученных исследователями этого региона. Дальнейшее моделирование «граничных» разломов в вертикальном измерении основывалось на строгой ранее установленной привязке последних на дневной поверхности.

Итогом проведенных исследований стали заключения о том, что в земной коре ВРГ наблюдается чередование реологически хрупких и пластичных слоев. В верхней части разреза выделяется высокорефлективная хрупкая кора. Она аккумулирует подавляющее количество очагов землетрясений и характеризуется высокой степенью латеральной неоднородности. Выделяемые в сечения профиля «граничные» разломы, а также и другие разрывные нарушения в вертикальном сечении преимущественно имеют листрический характер. Во многих случаях эти дислокации

трассируются цепочками или же ареалами очагов землетрясений и замыкаются на субгоризонтальный слой повышенной рефлексивности (10 - 14 км). В пределах последнего уровень сейсмичности заметно снижается. Результаты реологического моделирования указывают на то, что на сопоставимых глубинах наблюдается значительное понижение прочности пород, что в совокупности с другими заключениями позволяет сделать вывод о том, что высокорефлексивная зона, контрастно проявляющаяся на сейсмическом разрезе, маркирует положение зоны первого хрупко-пластического перехода.

Залегающая гипсометрически ниже «переходная» кора проявляется на разрезе как сейсмически прозрачная область. В ее пределах наблюдаются лишь отдельные рефлекторы и к ней приурочены единичные очаги землетрясений. На реологической диаграмме эта область земной коры соответствует повышению прочности породы. На этом глубинном уровне в условиях недостаточного количества информации представляется возможным лишь наметить трассы разломов.

В нижней коре характер пространственного распределения рефлексивности и отсутствие очагов землетрясений не позволяют подтвердить наличие и пространственное расположение второго слоя ХПП, теоретическое обоснование которого следует из анализа реологической модели.

Глубинное строение Байкало-Становой региональной сдвиговой зоны (БСЗ) в сечении профиля 1-СБ

Мировой опыт исследований глубинного строения региональных сдвиговых зон и научно-теоретические заключения, сделанные в ходе аналогичных авторских исследований, более подробно о которых освещаются в главе 2 и 3 работы, свидетельствуют о том, что земная кора Байкало-Становой региональной сдвиговой зоны характеризуется многослойной структурой. Результаты комплексной интерпретации геофизических данных отражают наличие хрупкой верхней коры, в пределах которой широко проявлены тектонические нарушения, преимущественно листрического характера (рис. 1). Положение дислокаций на дневной поверхности было зафиксировано по результатам линеаментного анализа и дешифрирования космоснимков в полосовой зоне геотраверса 1-СБ.

В разрезе опорного геофизического профиля 1-СБ эти разломы отчетливо маркируются многочисленными очагами землетрясений и трассируются до глубин 14-15 км. Следующим

структурным этажом, играющим принципиальную роль в глубинной морфологии этой зоны, является выделяемый автором слой хрупко-пластичного перехода. Этот слой контрастно проявляется на сейсмическом разрезе МОВ-ОГТ как субгоризонтальная зона повышенной рефлексивности. Слой относительно выдержан по простиранию и имеет мощность 3-5 км. Характерной его особенностью является замыкание в его пределах верхнекоровых листрических дислокаций. «Переходная» кора характеризуется сейсмической «прозрачностью» и практическим отсутствием очагов землетрясений. Последним структурным этажом является нижняя кора, которая характеризуется возрастанием уровня сейсмичности. Структурно-вещественные неоднородности в ее пределах, вероятно, имеют листрический характер и выполаживаются на расположенный ниже субгоризонтальный высокорефлективный слой. Подошвой последнего является граница Мохоровичича (рис. 1).

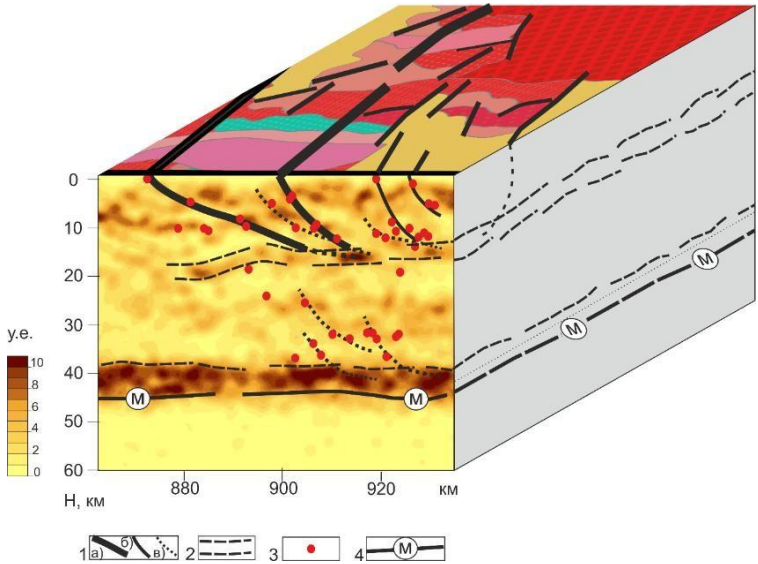


Рисунок 1 Модель глубинного строения земной коры БСЗ в сечении геотраверса 1-СБ (получена с использованием данных, предоставленных отделом ЦГГФ ФГБУ «ВСЕГЕИ»)

Условные обозначения: 1 – разрывные нарушения: а – главные, б – второстепенные, в – предполагаемые по геофизическим и сейсмологическим данным; 2 – границы субгоризонтальных

высокореклефтивных пачек; 3 – очаги землетрясений; 4 – предполагаемое положение границы Мохоровичича

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

В ходе предметного анализа комплексных исследований глубинного строения земной коры крупнейших региональных сдвиговых зон и аналогичных авторских исследований в полосовой зоне геотраверса 1-СБ, была разработана методическая схема, позволяющая проводить моделирование тектонических дислокаций как в латеральном, так и вертикальном измерениях. Особенностью этой схемы является ее строгая упорядоченность в последовательности приемов сбора, обработки и интерпретации геологических и геофизических и прочих материалов. Весь объем работы с данными подразделяется на несколько последовательно выполняемых стадий. Основной задачей каждой из них является подготовка и систематизация информации для проведения дальнейших операций, ориентированных на выделение особенностей глубинной морфологии земной коры.

Стадия 1. Формирование банка геолого-геофизических данных

Определяющим звеном в изучении глубинного строения земной коры, наряду с анализом опыта исследований прошлых лет, является сбор максимально широкого комплекса геолого-геофизической информации об объекте исследования. В формируемые рабочие банки данных включаются 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 площадном распределении и в сечениях геотраверсов.

Современные знания о геологическом строении территории развития Байкало-Становой региональной сдвиговой зоны (листы миллионного масштаба государственной геологической карты О 48-53; N 48-53 являются результатом многолетней работы геологов отраслевых и академических

институтов: «ВСГЕИ», «СНИИГиМС», ИМГРЭ, МГУ, СО АН СССР, ЛАГЕД АН СССР, ВостСибНИИГиМС и др.) и производственных организаций (Аэрогеология, Алданзолото, Золоторазвека, и др.). Наиболее актуальными, на сегодняшний день, являются геологические основы масштаба 1:1 000 000 государственной геологической карты третьего поколения, изданные ФГБУ «ВСЕГЕИ». Наряду с этим, наиболее значимыми событиями в области геологического картографирования Забайкальского и Дальневосточного регионов является составление тектонических карт и схем 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 региона внесли работы: К.Г. Леви, С.И. Шермана, Л.М. Парфенова, М.И. Кузьмина, В.А. Санькова, А.В. Парфеев и др.

Для картирования пространственного распределения тектонических нарушений на дневной поверхности территории исследований выполняется анализ и интерпретация разномасштабных и разнотипных картографических данных:

- геологических карт масштаба 1:1 000 000 и 1: 2 500 000, изданные ФГБУ «ВСЕГЕИ»;
- геофизических основ листов Государственной геологической карты масштаба 1: 1 000 000 третьего поколения, охватывающих территорию развития Байкало-Становой сдвиговой зоны (включая цифровые модели потенциальных геофизических полей и их трансформаций);
- космоснимков Landsat 7 (с разрешением 1 пиксель = 150 м поверхности), предоставленных центром дистанционных исследований и геоинформационных технологии ФГБУ «ВСЕГЕИ»;
- карта теплового потока масштаба 1:5 000 000, предоставленная центром геофизического обеспечения ФГБУ «ВСЕГЕИ»;
- схемы распределения очагов землетрясений (каталоги Геофизической службы РАН г. Обнинск, Байкальского филиала Геофизической службы РАН. Каталоги землетрясений, произошедших в сейсмоактивных регионах СССР, составлены на основе данных, опубликованных в ежегодниках "Землетрясения в СССР в 1962 - 1991 году", изданных под редакцией Н.В. Кондорской и др. в издательстве "Наука. Каталоги землетрясений, произошедших в сейсмоактивных

регионах Северной Евразии, составлены на основе данных, опубликованных в ежегодниках "Землетрясения Северной Евразии, СССР в 1992 - 2009 годах", издаваемых под редакцией О.Е. Старовойта и др.).

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.

При моделировании тектонических нарушений в вертикальном измерении принципиальную роль играют материалы геофизических съемок методами МОВ-ОГТ, ГСЗ, МОВЗ, выполненных вдоль опорных профилей проект БАЗАЛЬТ (в 1990-х годах. Наряду с этим, высокую информативность несли в себе результаты геофизических исследований вдоль геотраверсов 3-ДВ (южный участок) и 1-СБ, выполненных в начале XXI в. силами ФГБУ «ВСЕГЕИ», АО СНИИГиМС и ОП «Спецгеофизика», ООО «Северо-Запад». Фактографические данные полученные в этих сечениях (сейсмические МОВ-ОГТ и ГСЗ, геоэлектрические МТЗ разрезы и обобщенные автором данные распределения очагов землетрясений в сочетании с интерпретационными моделями земной коры) независимо отображающие различные параметры структуры и состава земной коры сдвиговой зоны были включены в рабочий банк данных.

Большие объемы вовлекаемых в работу материалов привели к необходимости разработки приемов сопоставления разнообразных фактологических и интерпретационных материалов. В связи с этим, важным этапом является проведение разнообразных операций унификации всего набора данных. Подготовка материала к дальнейшей работе проводилась, как автоматизировано с помощью пакетов географических информационных систем (ГИС) (ArcGIS, QGIS, MapInfo, Google Earth и др.), так и вручную с использованием традиционных визуальных способов картографирования (масштабирование и визуальный картографический анализ). Наряду с этим, проводилось приведение разнотипных материалов к сопоставимому образно-знаковому представлению с использованием различных графических редакторов, таких как программа Corel Draw и ее аналоги.

Стадия 2. Моделирование латерального распределения структурно-вещественных неоднородностей земной коры

Основными требованиями к выбору оптимального набора процедур качественной интерпретации данных является их информативность при решении задач моделирования зонально-блокового строения земной коры исследуемой территории и возможности представления результатов обработки в сопоставимой образно-знаковой форме.

Принципиальными операциями при моделировании структурно-вещественных неоднородностей в латеральном измерении являются способы качественной интерпретации (автоматизированный и визуальный линеаментный анализ) потенциальных геофизических полей и их трансформант. Предварительная обработка гравитационного и магнитного полей была выполнена с использованием пакетов специализированных программ Surfer, COSCAD 3D. Процедуры обработки включают в себя получение градиентных составляющих потенциальных полей (горизонтальный и полный), и визуализацию исходных матриц с различным положением искусственного источника света. Важную информацию при картировании тектонических нарушений отражают результаты дешефрирования космоснимков. В рамках поставленных задач наиболее эффективным является представление композиционного космоснимка в комбинации 7, 4 и 2-го каналов.

Последующая верификация разработанных схем качественной интерпретации разных источников между собой с привлечением результатов неотектонических исследований и геологических основ позволяет перейти к формированию итоговой схемы распределения тектонических дислокаций Байкало-Становой сдвиговой зоны. На данном этапе результаты других геофизических исследований (геотермических, сейсмологических) играют активную, но по большей части вспомогательную роль.

Стадия 3. Моделирование вертикального распределения структурно-вещественных неоднородностей земной коры

Строго установленное пространственное положение структурно-вещественных неоднородностей на дневной поверхности служит отправной точкой для проведения операций их глубинного моделирования. Принципиальное значение в этом процессе приобретает максимально полное использование как

фактических данных, так и учет научно-теоретических представлений о природе структурно-вещественных неоднородностей земной коры.

Принципиальную информацию об особенностях глубинного строения земной коры несут в себе как исходные глубинные сейсмические разрезы, так и результаты пересчета последних в показатели рефлексивности. Опыт ранее проведенных исследований показывает, что такой способ визуализации позволяет подчеркивать высокую гетерогенность земной коры с широким проявлением складчато-надвиговых деформаций в верхней части разреза и радиальной расслоенности земной коры в целом.

Наряду с сейсмическими данными, важную информацию отражают глубинные модели эффективной плотности и намагниченности в коре. Освещение способов их расчета заслуживает детального рассмотрения, так как подобные задачи характеризуются неустойчивостью и неоднозначностью решения. В ходе авторских исследований предпочтение отдавалось способу томографии потенциальных полей, разработанному Штокаленко М. Б. (ФГУНПП "ГЕОЛОГОРАЗВЕДКА").

Результаты выноса на сейсмический разрез в показателях рефлексивности очагов землетрясений позволяют получить дополнительную аргументацию при выделении и прослеживании на глубину структур тектонической деструкции. Выбор «буферной зоны», в пределах которой происходит выборка землетрясений опирается на опыт ранее проведенных исследований. Установлено, что ее ширина зависит главным образом от уровня сейсмичности региона. В проводимых исследованиях автором была выбрана 10-км буферная зона вдоль опорных геофизических профилей 1-СБ и 3-ДВ.

Принципиально новую информацию о глубинном строении земной коры дают материалы реологического моделирования, выполненные в рамках комплексных исследований зон-аналогов (Сан Андреас, Верхнерейнская тектоническая зона). Эти исследования отражают зависимость величины прочности горной породы от глубины ее залегания и опосредованно позволяют судить о типе деформаций (хрупких или упруго-вязких). Результаты, полученные в ходе исследований, легли в основу научно-теоретических заключений о присутствии в разрезе земной коры слоев изменения типа деформаций – слоев ХПП. Эти данные

1-2 - блоки с древней корой континентального типа: 1- Сибирской платформы, 2- фанерозойских складчатых областей; 3-4 – межблоковые сутурные зоны: 3 - эпикаледонские, 4 - эпикиммерийские; 5-6 - ареалы складчатых деформаций на окраинах блоков с древней корой континентального типа: 5 - эпикаледонские, 6 - эпикиммерийские; 7- тектонические дислокации Байкало-Становой сдвиговой зоны: а- магистральный разлом, б- второстепенные тектонические дислокации, в – предполагаемые разломы г – разломы Монголо-Охотской шовной зоны.

Сопоставление линейных особенностей геофизических полей, их трансформант, цифровых моделей рельефа и распределения очагов землетрясений 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. Картируется большое количество второстепенных разломов, которые часто выступают в роли тектонических «перемычек» между сегментами главного разлома. Отмечается их кулисообразная и в ряде случаев линейная морфология. Интересной особенностью, установленной по результатам анализа латерального распределения структурно-вещественных неоднородностей земной коры региона, является наличие пространственной связи Байкало-Становой сдвиговой зоны с развивающимся южнее левосторонним региональным сдвигом Монголо-Охотской шовной зоной по системе оперяющих дислокаций. Установлено, что сочленение происходит в области наибольшего изгиба трассы фрагмента магистрального шва БСЗ.

*Моделирование структурно-вещественных
неоднородностей земной коры Байкало-Становой сдвиговой зоны в
сечении профиля 3-ДВ*

Наличие строго зафиксированного положения разрывных нарушений в плане позволило, закрепив верхние точки этих дислокаций, трассировать их в сечении опорных профилей. Моделирование структурно-вещественных неоднородностей в вертикальном измерении основывались на визуальном анализе взаимного 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. На

проведение комплексной интерпретации большое влияние оказали данные сейсмологических и реологических исследований. Было установлено, что основное количество литрических структурно-вещественных неоднородностей локализуется в верхней хрупкой коре (до 15 км) сдвиговой зоны (рис. 3).

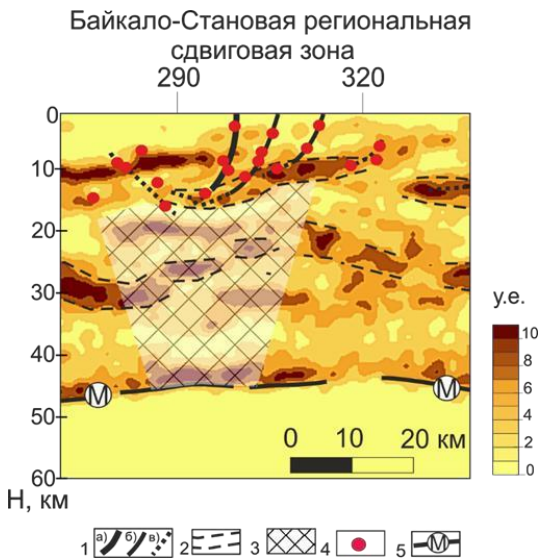


Рисунок 3 Схематическая модель глубинного строения БСЗ в сечении геотраверса «З-ДВ». Сейсмический разрез в показателях рефлексивности получен с использованием материалов ЦГГФ ФГБУ «ВСЕГЕИ»

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

Дальнейшая уверенная трассировка тектонических дислокаций возможна лишь до глубин 10-17 км. Здесь фиксируется радикальное снижение уровня сейсмичности, которое хорошо согласуется с областью развития субгоризонтального высокорекфлексивного слоя (мощность около 4 км.), выделенного на сейсмическом разрезе МОВ-ОГТ. Отмечается, что на этих глубинных горизонтах изменяется инфраструктура сейсмического

разреза - наблюдается доминирующее количество субгоризонтальных рефлекторов. Установлено, что на сопоставимых глубинах фиксируются зоны максимальных градиентов на глубинных моделях эффективной намагниченности и плотности. Наряду с этим, выделенный высокорекфлексивный слой на магнитотеллурическом разрезе отчетливо маркируется высокоградиентной зоной перехода от высоких сопротивлений к низким. Необходимо отметить, что сопоставление результатов анализа распределения волноводов по данным ГСЗ и положения высокорекфлексивного слоя на разрезе МОВ-ОГТ свидетельствуют о том, что к подошве последнего приурочены домены, характеризующиеся инверсией сейсмических скоростей.

Результаты анализа формы тектонических нарушений, инфраструктуры сейсмического разреза и распределения сейсмичности в коре позволяют предположить выполаживание разломов в пределах субгоризонтального высокорекфлексивного слоя (12-17 км).

Моделирование разрывных дислокаций БСЗ в сечении 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 локализуется глубинный канал сдвиговой зоны. Необходимо отметить, что высокоинтенсивные отражения от субгоризонтальных площадок фиксируются также на глубинах 20-30 км.

Установить физическую природу и тектоническую роль выделенных субгоризонтальных высокорекфлексивных зон позволяет анализ реологических моделей, полученных для сопоставимых величин теплового потока, фиксируемого на дневной поверхности (55-60 мВт/м²). Результаты свидетельствуют о том, что в коре на глубине 10-17 км предполагается развитие слоя хрупко-пластического перехода. Данное предположение подтверждается распределением очагов землетрясений, максимальные глубинные отметки которых относятся к 17 км. Сопоставляя полученные данные, автором предполагается интерпретация данного высокорекфлексивного слоя, как области ХПП в земной коре.

*Моделирование структурно-вещественных неоднородностей
земной коры Монголо-Охотской шовной зоны в сечении профиля 3-
ДВ*

С целью изучения особенностей глубинного строения смежной Монголо-Охотской шовной зоны (МОШ) был проведен аналогичный комплекс работ в пределах полосовой зоны профиля 3-ДВ. Основой при моделировании разломов в сечении геотраверса выступали геофизические, сейсмологические данные и реологические модели, заимствованные из сформированного ранее фактологического банка данных.

Было установлено, что подавляющее число тектонических дислокаций МОШ закономерно локализуется в пределах верхней хрупкой коры. Для зоны характерен высокий уровень латеральной неоднородности. В сечении разреза последовательно проявляются высокорелективные субгоризонтальные пачки, сменяемые зонами с умеренной и низкой реллективностью (рис. 4).

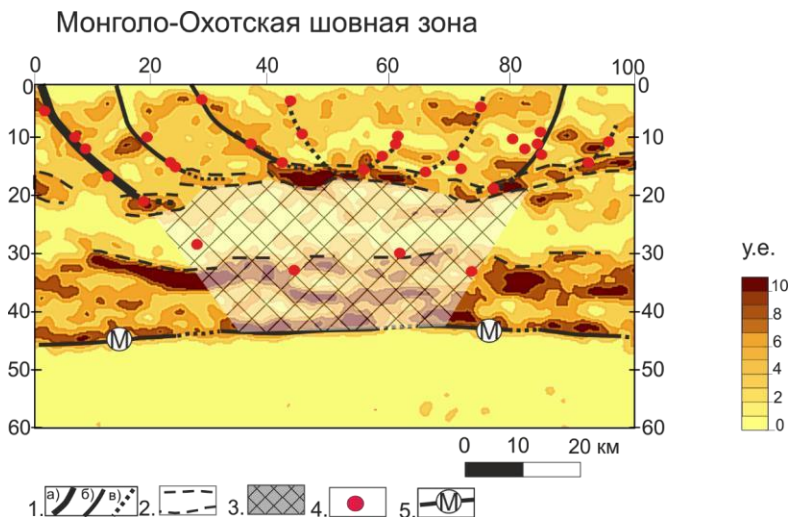


Рисунок 4 Схематическая модель глубинного строения земной коры Монголо-Охотской шовной зоны в сечении геотраверса 3-ДВ (получена с использованием данных, предоставленных отделом ЦГГФ ФГБУ «ВСЕГЕИ»)

Условные обозначения: 1 – разрывные нарушения, выделенные по комплексу геолого-геофизических данных: главные (а) и второстепенные (б), прослеженные уверенно в разрезе верхней коры; предполагаемые только по геофизическим данным (в); 2 – границы

субгоризонтальных высокорективных слоев; 3 – ареал возможной локализации глубинного канала БСЗ; 4 – очаги землетрясений; 5 – граница Мохоровичича.

Характерной особенностью формы тектонических дислокаций в вертикальном измерении является их установленный листрический характер. Здесь разрывные нарушения, как и в пределах БСЗ, отчетливо маркируются наклонными рефлекторами на сейсмическом разрезе и очагами землетрясений. Подавляющее количество последних локализуется в пределах хрупкой верхней коры и значительно снижается в пределах нижней. Анализ формы листрических разрывных нарушений позволяет предположить их выполаживание в пределах субгоризонтального высокорективного слоя, картируемого на сейсмическом разрезе на глубинах от 17 до 20 км мощностью 3-4 км. На глубинных моделях распределения эффективных плотностей и эффективной намагнитченности на этом интервале глубин проявляется зона максимальных градиентов. Геометрия этих зон приближенно повторяет форму высокорективного слоя.

Опираясь на результаты реологического моделирования, распределение очагов землетрясений, а также проведенных ранее исследований в земной коре позволяют интерпретировать выделенный субгоризонтальный высокорективный слой как зону «хрупко-пластичного перехода» земной коры.

Земная кора, располагающаяся гипсометрически ниже выделенного слоя ХПП (глубины 20-30 км), характеризуется сейсмической прозрачностью и практически полным отсутствием сейсмичности. В отсутствии отчетливых индикаторов тектонических нарушений представляется невозможным проведение здесь операций моделирования глубинного шва Монголо-Охотской зоны. В связи с вышесказанным, по аналогии с проведенными исследованиями в пределах БСЗ, автором намечается ареал, в пределах которого наиболее вероятно и развивается этот глубинный канал.

Публикации

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. Ageev A.S. Deep structure of San Andreas faults system according to geophysical investigation // 67th Berg- und Huttenmannischer Tag 2016, 2016. pp 156-159.
 3. **Агеев А.С., Егоров А.С. Морфология сдвиговых дислокаций неоген-антропогенного возраста Байкало-Становой региональной сдвиговой зоны // Естественные и технические науки. №4, 2017 г. С. 47-52.**
 4. Агеев А.С. Егоров А.С. Лобашова А.Г. Зонально-блоковое строение Байкало-Становой складчатой области по данным комплексных геофизических исследований в створе профиля 3-ДВ южный участок // 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 г.
 5. **Агеев А.С. Егоров А.С. Особенности глубинного строения Байкало-Становой региональной сдвиговой зоны по данным комплексной интерпретации геологических, геофизических и дистанционных данных в створе профиля 3-ДВ (южный участок) // Региональная геология и металлогения № 70, 2017 С. 36-40.**
 6. Агеев А.С. Егоров А.С. Структурно-вещественные неоднородности земной коры в пределах региональных сдвиговых зон по результатам комплексной интерпретации геолого-геофизических данных // Материалы I Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2018. С. 359-363.
 7. **Агеев А.С. Егоров А.С. Основные черты глубинной морфологии Байкало-Становой тектонической зоны по результатам интерпретации геолого-геофизических материалов // Региональная геология и металлогения №73, 2018 С. 19-23.**