

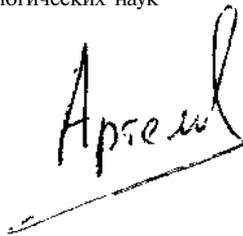
На правах рукописи

АРТЕМЬЕВ Александр Александрович

**СЕЙСМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ЗЕМНОЙ КОРЫ
ЮГА БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ
И СОПРЕДЕЛЬНЫХ ТЕРРИТОРИЙ
ПО ДАННЫМ МЕТОДА ПРИЕМНОЙ ФУНКЦИИ**

Специальность 25.00.10 - геофизика, геофизические методы поисков
полезных ископаемых

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Артемьев', written in a cursive style. The signature is positioned below the text of the dissertation and is underlined with a single horizontal stroke.

Иркутск - 2005

Работа выполнена в Институте земной коры СО РАН

Научные руководители

кандидат физико-математических наук В В Мордвинова
доктор геолого-минералогических наук Ю А Зорин

Официальные оппоненты

доктор геолого-минералогических наук А И Дмитриев
кандидат геолого-минералогических наук В И Мельникова

Ведущая организация ОИП М СО РАН (г Новосибирск)

Защита состоится 26 мая 2005 г в 9 часов на заседании диссертационного
совета Д 003 022 02 в Институте земной коры по адресу
664033, г Иркутск, ул Лермонтова, 128

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института земной коры
СО РАН

Автореферат разослан 22 апреля 2005 г

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд геол мин наук



ЮВ Меньшагин

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Знание глубинного строения коры и мантии под различными геологическими структурами имеет большое значение для понимания механизма образования этих структур и разработки геодинамических моделей. Представления о глубинной структуре земных недр формируются на основе интерпретации данных геофизических методов, из которых наиболее надежную информацию дают сейсмические методы. По многим причинам географического и экономического характера изученность земных недр под юго-западной частью Байкальской рифтовой зоны, южной окраиной Сибирской платформы и складчатыми областями Западного Забайкалья и Центральной Монголии оказалась весьма неравномерной по площади. К тому же при сейсмических исследованиях использовались либо короткопериодные волны (метод ГСЗ на российской части территории), либо длиннопериодные волны (метод поверхностных волн). Результаты глобальной сейсмической томографии на Р-волнах не отличаются большой детальностью из-за редкой сети стационарных станций.

Существенное улучшение изученности глубинного строения может быть достигнуто путем наблюдений на временных сетях портативных цифровых сейсмических станций. Записи далеких землетрясений временными станциями могут использоваться как для детальной сейсмической томографии, так и для исследования строения коры и мантии методом receiver function, который в русскоязычной литературе обычно именуется методом приемной (передаточной) функции или функции приемника. Основой метода является анализ обменных (Р на S) волн в частотном диапазоне 0,2-0,9 Гц, который не использовался ранее при сейсмических исследованиях в рассматриваемом регионе. Применение указанного метода позволило получить новую сравнительно детальную информацию о сейсмической (скоростной) структуре земной коры и верхов мантии, что может служить основой для существенного уточнения представлений о тектонике и геодинамике рассмотренных регионов.

Цель работы - построение двумерной и трехмерной моделей скорости распространения поперечных сейсмических волн в земной коре и мантии до глубины 75 км для южной части Байкальской рифтовой зоны и сопредельных территорий Сибири и Монголии по записям объемных сейсмических волн на основе использования метода приёмной функции.

Задачи исследования , поставленные для достижения цели работы:

- по записям временных цифровых сейсмических станций, действовавших в 1991-1992 и в 2003 годах, выделить экспериментальные волновые формы приёмной функции;
- провести тестирование разрешающей способности инверсии функций приёмника при используемом частотном диапазоне для изучения структуры земной коры;
- выбрать начальные параметры для решения обратной задачи метода приёмной функции;
- получить одномерные разрезы скорости поперечных волн для каждой станции путем решения обратной задачи сейсмологии методом подбора;
- на основе одномерных скоростных разрезов построить двумерную и

трехмерную модели скоростной структуры земной коры и верхов мантии, сопоставить попученные сейсмические результаты с другими геофизическими и геологическими данными

Фактический материал и методика исследования. В качестве исходных данных для выделения экспериментальных воановых форм функции приемника были использованы цифровые трехкомпонентные записи далеких землетрясений, полученные в результате двух сейсмических экспериментов российско-американского и француско-российско-монгольского, которые проведены на территории Восточной Сибири и Центральной Монголии в 1991 - 1992 годах и в 2003 году, соответственно

Для получения сведений о сейсмических скоростях в коре и в верхах мантии к записям объемных волн телесейсмических событий применена методика выделения и инверсии функций приемника, то есть волновых функций, обусловленных скоростной структурой в районе регистрации (Kind, Kosarev, Peterson, 1995) Данная методика является одной из версий метода receiver function (Phinney, 1964, **Burdick & Langston, 1977**, Owens, Zandt & Taylor, 1984, Bertrand, Deschamps, 2000) Для выбора начальных приближений при построении моделей использовались скоростные параметры, установленные методом глубинного сейсмического зондирования для некоторых районов исследуемой территории Для интерпретации полученных моделей были привлечены результаты геологических и геофизических исследований, проводимых в Институте земной коры СО РАН (**Zopp et al, 1993; Зорин и др., 1994; Зопп, 1999; Зопп et al, 2002**)

Защищаемые положения

- 1 На основании численного моделирования установлено, что метод приемной функции (receiver function) при использовании даже сравнительно узкого диапазона частот колебаний позволяет обнаружить в земной коре границы обмена, несмотря на то, что соответствующие им вступления обменных волн практически не разделяются из-за взаимного наложения фаз
- 2 По одномерным скоростным разрезам, полученным путем инверсии приемных функций, которые выделены по телесейсмическим записям 60 временных цифровых станций, построены двухмерная (профиль Братск - Иркутск - Улан-Батор - Ундуршил) и трехмерная (район Южного Байкала и его окрестностей) модели распределения скорости поперечных сейсмических волн в земной коре и верхах мантии
- 3 Результатами исследования подтверждены данные других методов об основных чертах структуры земной коры Байкальской рифтовой зоны и сопредельных территорий Южно-Байкальская впадина в региональном плане приурочена к зоне перехода от относительно тонкой коры Сибирской платформы к утолщенной коре складчатых областей Забайкалья и Монголии, а непосредственно под этой впадиной намечается локальное утонение коры
- 4 На различных глубинах в земной коре под Байкальской рифтовой зоной, под складчатыми областями Забайкалья и Монголии а также под Сибирской платформой методом приемной функции обнаружен ряд слоев пониженной скорости, основная часть которых может соответствовать мощным

анизотропным зонам милонитов, сопровождающим крупно-амплитудные надвиги

Научная новизна и личный вклад автора.

Автор является одним из двух российских исполнителей француско-российско-монгольского телесеизмического эксперимента 2003 года. Он принимал непосредственное участие во всех этапах работ на российской части профиля наблюдений. Автором выделены функции приемника для поперечных обменных волн по записям 60-ти пунктов наблюдения экспериментов 1991, 1992 и 2003 годов. Инверсией функций приемника автором получено распределение скорости распространения поперечных сейсмических волн для верхних 75 километров земных недр. Все результаты работы по скоростной структуре исследуемого региона являются принципиально новыми:

1. С использованием сейсмических записей от далеких землетрясений в диапазоне частот 0.2 - 0.9 герц, который в данном регионе ранее не использовался, получены новые данные о сейсмической структуре земной коры и самой верхней мантии

2. Построена двумерная модель распределения скоростей S-волн для профиля Братск - Иркутск - Улан-Батор - Ундуршил и трехмерная модель для района Южного Байкала и его окрестностей. Достоверные данные о строении земной коры Центральной Монголии получены впервые.

3. Метод приемной функции позволил выделить слои пониженных сейсмических скоростей в земной коре не только под Байкальской рифтовой зоной, где такой слой выявлен ранее по данным ГСЗ, но и под складчатыми сооружениями Забайкалья и Монголии, а также под Сибирской платформой.

Практическая значимость работы. Полученное распределение сейсмических скоростей до глубины 75 км может быть использовано в комплексе геолого-геофизических данных для изучения и картирования глубинного строения земной коры. На основании построенных сейсмических моделей, отражающих чередование слоев повышенной и пониженной скорости в коре, с привлечением гравиметрических и геологических данных разработана концепция существования в южной части Восточной Сибири и в Монголии крупно-амплитудных надвигов, которые могут контролировать расположение месторождений различных полезных ископаемых (Zorin, 1999; Zorin et al., 2002).

Распределение скоростей сейсмических волн в коре и в самой верхней мантии может служить априорной дополнительной информацией при последующем термомеханическом моделировании геодинамических процессов, так как накладывает некоторые ограничения на представление о структуре литосферы

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на третьей (2001г.), четвертой (2002г.) и пятой (2004г.) Байкальских молодежных школах-семинарах «Геофизика на пороге третьего тысячелетия», на III и IV российско-монгольских конференциях по астрономии и геофизике (Иркутск 2002, Улан-Батор 2003), на первой Сибирской международной конференции молодых ученых по наукам о Земле (Новосибирск 2002), на научно-производственной конференции, посвященной 55-летию предприятия «Иркутскгеофизика» (Иркутск 2004) и на совещании «Геодинамическая

эволюция литосферы Центрально Азиатского подвижного пояса» в Иркутске (2004) По теме диссертации опубликовано 10 работ в соавторстве

Структура и объем работы. Диссертация состоит из шести глав, Введения, Заключения и Приложения Объем работы составляет 119 страниц, 41 рисунок и 5 таблиц Приложения Список литературы включает 118 наименований отечественных и зарубежных публикаций

Благодарности. Автор благодарен коллегам из лаборатории комплексной геофизики Института земной коры СО РАН за всестороннюю поддержку Особенную признательность выражаю научным руководителям к ф м н В В Мордвиновой и д г -м н Ю А Зорину за постановку задачи, консультации, постоянное внимание и участие в выполняемой работе, а также к г -м н Е Х Турутанову и к г м н В А Санькову за конструктивные замечания, учет которых способствовал улучшению текста диссертации

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 99-05-64864, 02-05 22005 НЦНИ-а, 04-05-64996)

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава представляет литературный обзор изученности геологического строения, геофизических полей и глубинной структуры южной окраины Сибирской платформы, юга Байкальской рифтовой зоны и складчатых поясов Забайкалья и Монголии Особое внимание уделено изученности скоростного строения региона

Методом глубинного сейсмического зондирования (Крылов и др, 1981, Пузырев, 1993, Suvogov et al, 2002) с привлечением данных по близким землетрясениям (Крылов и др, 1974) получено общее представление о вариациях толщины земной коры по площади южной части Восточной Сибири, а также о скоростном разрезе земной коры и верхов мантии этого региона В земной коре Байкальской рифтовой зоны выделен слой пониженной скорости, который может быть связан как с процессами дегидратации при повышении температуры, так и с пологими тектоническими нарушениями (Пузырев, 1993)

Сверхглубинные сейсмические зондирования, выполненные по профилю "Рифт" с использованием ядерных взрывов, показали, что область низкоскоростной мантии под Байкальским рифтом распространяется от подошвы коры до глубин, превышающих 100 км (Егоркин А В и др, 1996) Методом МОВ ОПТ в океанографическом варианте оценена мощность кайнозойских осадков во впадине озера Байкал (Hatchinson et al, 1992)

Наиболее общее представление о скоростных аномалиях до глубин порядка 400 км на территории Сибири и Монголии получено методами поверхностно волновой томографии (Yanovskaya and Kohzevnikov, 2003) и томографии на отраженных волнах по схеме PP - P (Bushenkova et al 2002) Разрешающая способность этих методов невелика Для поверхностно волновой томографии *на длинных волнах* разрешение по площади составляет порядка 500X500 км разрешение по вертикали на порядок выше В томографии на отраженных волнах несколько лучшее разрешение по горизонтали, но размыв границ по вертикали более 100 км

Чтобы обойти проблему отсутствия необходимой сети наблюдений для определения скоростного строения коры и верхней мантии была применена

инверсная схема томографии (Petit, Kulakov, Deverchere, 1998; Кулаков, 1999). Однако эти результаты по Байкальской рифтовой зоне вошли в противоречие с наблюдаемыми запаздываниями сейсмических волн (Рогожина, Кожевников, 1979).

Более детальное представление о скоростных неоднородностях до глубины 200-400 км получено томографическими исследованиями по данным международного телесеismicкого эксперимента 1991-1992 (рис.1), что обусловлено сравнительно небольшим расстоянием (порядка 40 км) между сейсмостанциями. Однако на результатах отразились различия в методиках интерпретации (Burkholder et al., 1995; Мордвинова и др., 2000; 2002; Tiberi et al., 2003).

Несмотря на неплохую в целом изученность рассматриваемой территории сейсмическими методами, оставался ряд нерешенных вопросов, к числу которых относятся тонкая слоистость земной коры в Прибайкалье, Забайкалье и Монголии, а также общая структура коры в Монголии. Перспективным для решения этих вопросов представляется метод приемной функции, использованный в настоящей работе.

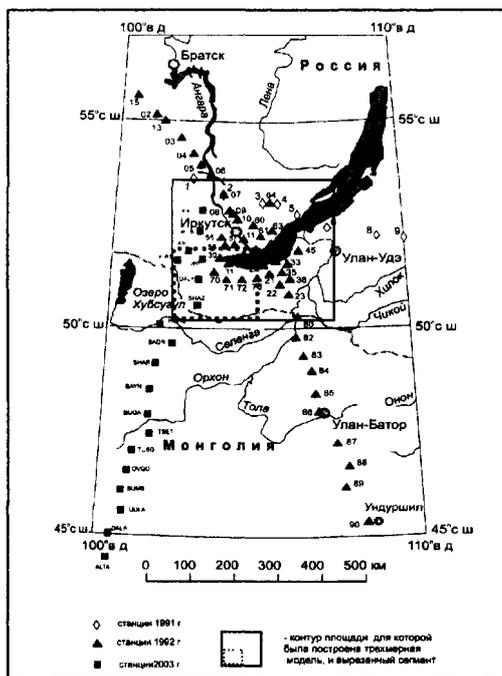


Рис 1 Расположение станций телесеismicкого эксперимента

Во второй главе излагаются теоретические основы используемого в работе метода, суть которого состоит в расчете горизонтально-слоистых моделей подстанции скоростной структуры на основании подбора

теоретических функций приемника к наблюдаемым функциям, обусловленным вступлениями в коде Р волны обменных поперечных ВОЛН образующихся на границах 1-го и 2-го рода в районе регистрации

Вторичные поперечные обменные и многократно отраженные волны уже давно интенсивно используются для исследования общей структуры коры и верхней мантии (Phinney, 1964, Берзон, 1965, Fernandez & Careaga, 1968, Kunita, 1974, Vinnik, 1977, Burdick and Langston, 1977, Винник и Косарев, 1981, Мордвинова, 1983, Vinnik, Avetsjan, Mikharlova 1983, Owens et al., 1984, Kosarev et al., 1987, Мордвинова, 1988, Kind, Kosarev, Petersen, 1995, Bertrand Deschamps, 2000) Одна из главных задач при использовании вторичных волн - выделение функций, обусловленных только строением среды в районе наблюдающей станции Большинство работ, использующих приемные функции, направлено на исследование верхней мантии в интервале глубин 400-700 км При этом анализируются волны на частотах, не превышающих 0.2 Гц Основной объем записей телесейсмических экспериментов несколько более высокочастотного динамического диапазона ограничил данное исследование подстанционной структуры глубиной в 75 км

Для исследования скоростной структуры автором применена модификация метода, изложенная в (Kind, Kosarev, Peterson, 1995) Согласно ей анализ телесейсмических записей, как первый этап решения задачи, включает в себя три момента

(1) Поскольку максимальная амплитуда вторичных фаз не превышает 15% от амплитуды первичной Р-волны, непосредственное выделение на сейсмограмме этих фаз из коды Р-волны практически невозможно Для выделения вторичных поперечных волн исходные компоненты сейсмограммы Z, NS и EW проектируются на оси координатной системы, связанной с лучом L (для волны Р), Q (для SV), T (для SH)

(2) Чтобы сделать записи независимыми от формы несущей волны, те выделить информацию о структуре в районе приема, применяется метод деконволюции (обратной фильтрации) Обратная фильтрация выполняется во временной области (Berkhout, 1977) путем минимизации среднеквадратичного отклонения искомой функции от идеальной дельта-подобной функции с нормализованной амплитудой Для создания обратного фильтра используется форма Р-волны на L-компоненте, так как подразумевается, что форма волны в однородной мантии близка к форме волны на поверхности Компоненты каждой записи деконволюируются главной компонентой записи коды Р-волны Деконволюция трансформирует форму Р-волны каждого события в стандартный сигнал Вторичные фазы, подобные PS после деконволюции также стандартизованы и нормализованы на величину максимума L компоненты

(3) Чтобы улучшить соотношение сигнал/шум, устойчивость и надежность наблюдений производится суммирование спроектированных на новые оси и деконволюированных записей землетрясений с эпицентрами в широком диапазоне расстояний и азимутов Этот вид суммирования пригоден для плоской и осредненной модели коры Среднее эпицентральное расстояние по всем событиям используется как эпицентральное расстояние для суммарной сейсмограммы

Решение обратной задачи (инверсия подготовленных наблюдений) является вторым этапом работы. Автор использовал программу инверсии, разработанную Г.Л. Косаревым (Kind, Kosarev, Petersen, 1995). В процедуре инверсии применены теория плоских волн, допущение, что земная кора и верхняя мантия представляют собой пачку плоских однородных слоев, лежащих на однородном полупространстве (Haskell, 1962), и метод регуляризации для решения некорректных обратных задач (Тихонов и Арсенин, 1979; Гласко, 1984).

Таким образом, задача инверсии сама по себе является одномерной. Однако эта одномерность относится к ограниченной конусообразной области под станцией, в пределах которой (области) на границах формируются обменные и кратные отраженные волны, порожденные Р-волнами от выбранной совокупности телесейсмических событий. В целом результаты являются усредненными для пронизанных сейсмическими лучами площадок границ обмена волн. Диаметр площадок примерно равен их глубине. Для раздела Мохо размер площадки обмена около 40 км. Такого же порядка расстояния между нашими станциями (20 - 70 км). При коррелируемости слоев и границ обмена между станциями профиля можно получить представление о двумерной структуре. В случае площадных наблюдений появляется возможность получить модель трехмерной структуры.

В третьей главе дан краткий обзор крупномасштабных телесейсмических экспериментов, представлены основные моменты отбора данных и пример анализа записей далеких землетрясений методом receiver function, а также подготовленные к инверсии трассы приемных функций.

Российско-американский телесейсмический эксперимент по программе PASSCAL (Program for the Array Seismic Study of Continental Lithosphere) был проведен в 1991 и 1992 годах на юге Сибирской платформы, в южной части Байкальской рифтовой зоны и на территории Монголии (рис.1). На профиле, который пересекает главные тектонические районы Восточной Сибири и Центральной Монголии, функционировало 28 станций. В площадной системе наблюдений в районе южной части Байкальской рифтовой зоны были задействованы 32 станции (рис. 1). Периоды непрерывных наблюдений ограничивались тремя летними месяцами. Подавляющая часть станций была оснащена однопорцевыми трехкомпонентными сейсмометрами, записывающими скорости смещения грунта.

Во францужко-российско-монгольском телесейсмическом эксперименте MOBAL_2003 (Mongolian-Baikal Lithosphere seismological Transect) на субмеридиональном профиле, секущем юг Сибирской платформы, Саянский хребет, Тункинский бассейн, Джидинскую складчатую зону, Хангай и Гоби-Алтайский хребет, в течение 6 месяцев велась непрерывные записи скорости смещения грунта на 18 широкополосных цифровых сейсмических станциях. Широкая полоса пропускания позволяет получить записи, которые являются более информативными для изучения глубинного строения.

Из всего объема данных были выбраны записи телесейсмических событий с магнитудами более 5.0, эпицентрными расстояниями 30 - 80° (то есть с удалением 3000-9000 км), диапазоном обратных азимутов 120 - 200° для

событий 1991-1992 г.г. и со всеми возможными азимутами по данным 2003 года. Однако азимутальное заполнение вне диапазона 120-200° очень бедное из-за естественного распределения активных очаговых зон. Для анализа данных методом функции приемника по каждой станции отбирались события с четко выраженными первыми вступлениями и сравнительно быстро затухающими сигналами. Количество записей событий, удовлетворяющих методу, по сравнению со всем объемом наблюдений экспериментов, невелико: от 10 до 50 для станций 1991-1992 г.г. и от 50 до 120 для станций 2003 года. На основании спектрального анализа данных 1992 года для инверсии был принят частотный диапазон 0.2-0.9 Гц. Именно в этом диапазоне сейсмические колебания, пропускаемые сейсмографами подобными L4C, остаются достаточно интенсивными, а высокочастотные шумы исключаются полосовым фильтром. Для широкополосных данных 2003 года использовался частотный диапазон 0.01-0.9 Гц.

По записям каждой станции получены приемные функции для волн P (L), SV (Q) и SH (T). У Q-функций большинства станций в интервале 4-6 секунд после вступления P-волны на станцию отмечается максимум повышенной интенсивности, который соответствует запаздыванию относительно волны P обменной PS-волны, образованной на подошве земной коры, самой резкой границы на пути волн в районе регистрации. Поскольку толщина коры пропорциональна этому запаздыванию, Q-функции дают представление о вариациях в изменении глубины подошвы коры от станции к станции (рис.2, А, Б). Как на профиле 1992 года, так и на профиле 2003 года видим заглупление Мохо при переходе от Сибирской платформы к активным областям. Корреляция этого максимума затрудняется в пределах Байкальского рифта (станции 12, 24), где может иметь место постепенный переход от коры к мантии.

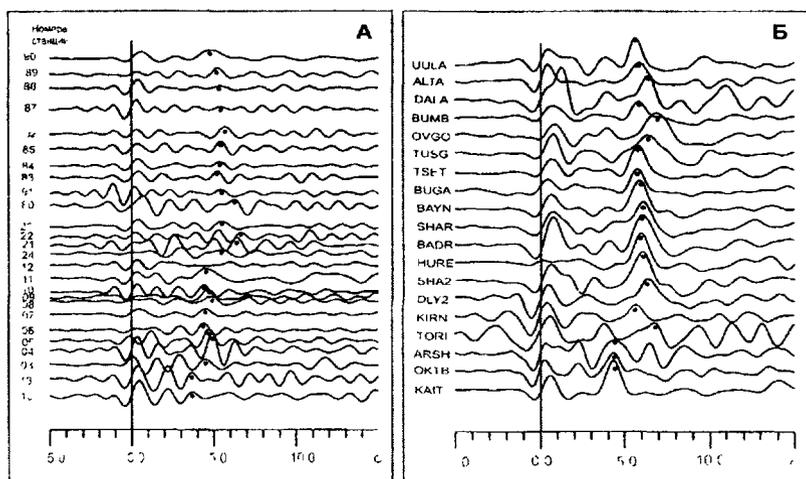


Рис 2 Приемные функции SV волн для станций судмеридиональных профилей 1992 (А) и 2003 года (Б)

В четвертой главе приводятся результаты тестирования разрешающей способности процедуры инверсии для используемой полосы частот 0.2-0.9 Гц (Zorin et al., 2002), параметризация начальных моделей скорости и плотности для решения обратной задачи и оценка точности восстановления скоростного разреза для поперечных волн по функции приемника.

Уже при первых попытках решения обратной задачи было обнаружено наличие в земной коре слоев пониженной скорости практически под всеми станциями (ранее такой слой, как было отмечено выше, выделялся по данным ГСЗ только под Байкальской рифтовой зоной). Так как эти элементы глубинной структуры представлялись новыми и важными в смысле изучения геологической структуры, основное внимание при тестировании разрешающей способности метода уделялось именно воспроизводимости слоев пониженной скорости. Для тестирования были построены модели с низкоскоростными слоями, которые вводились в усредненный скоростной разрез, полученный по данным ГСЗ для Саяно-Байкальской горной области (Пузырев, 1993). Толщина слоев пониженной скорости варьировалась от 4 до 6 км. Для тестовых моделей и реального стандартизованного Р-сигнала станции 4 рассчитывались синтетические SV-функции, чтобы принять в расчет возможную зашумленность SV-функции, к синтетической SV-трассе добавлен случайный шум, по максимальному уровню составляющий 15 % от средней амплитуды SV. В качестве начальных приближений для процедуры инверсии синтетических функций использовалась ступенчатая функция, описывающая тот же усредненный разрез S-волн, но без слоев пониженной скорости. На основании численного моделирования был сделан вывод об удовлетворительной разрешающей способности метода при работе с записями выбранного частотного диапазона даже при наличии помех. Выяснена необходимость осреднения скользящим окном результатов интерпретации для подавления ложных флуктуаций скорости.

Исходя из результатов численного моделирования, при инверсии станционных функций SV шаг по вертикали для основной части земной коры был принят равным 1 км. Для верхней, наиболее изменчивой по скорости части земной коры (до глубины 4-5 км) использованы шаги 0,5 км и менее. Для уточнения положения раздела Мохоровичича относительно его начального приближения шаг в 1 км сохранялся для верхних 4-6 км мантии. Более глубокие слои в мантии анализировались с шагом 5 км до глубины 75 км, начиная с которой мантия принималась однородным по скорости полупространством. При инверсии наблюдаемых приемных функций, как и при модельных расчетах, начальное приближение распределения скорости S-волн в земной коре задавалось в виде ступенчатой функции, моделирующей усредненный сейсмический разрез по данным ГСЗ для Саяно-Байкальской горной области (Пузырев, 1993) без слоев пониженной скорости. Поскольку методом ГСЗ лучше определяются скорости продольных волн, чем поперечных, значения скоростей S-волн для моделей начального приближения были рассчитаны из распределения скоростей Р-волн (Пузырев, 1993) путем деления их на средний для коры коэффициент отношения скоростей Р- и S-волн. Сведения о скоростях сейсмических волн в самой верхней мантии также грубо

учитывались в первом приближении заданием скорости 8 0 км/с под Сибирской платформой и 7 7 км/с на большей части профиля

На территории Монголии работы по глубинному сейсмическому зондированию не проводились. Однако, опираясь на данные о положительных невязках времен пробега того же порядка, что и в Байкальской рифтовой зоне (Рогожина и др., 1983), мы приняли в качестве начальных приближений для монгольских станций те же значения средней скорости под разделом Моховичича, что и для станций в Байкальском рифте. Плотность во всех моделях рассчитывалась согласно закону Берча (1961, 1964)

Так как изменение среднего значения скорости Р-волн в коре, оцененное по ГСЗ, в различных районах Восточной Сибири не превышает 0 2 км/с (Пузырев, 1993,) использование осредненного разреза ГСЗ приемлемо в качестве начального приближения при инверсии функции приемника. Таким образом, задача сводится к выявлению отклонения скоростной структуры от средних параметров коры и верхней мантии, полученных методом ГСЗ

В пятой главе представлены модели распределения скорости поперечных сейсмических волн в интервале глубин от 0 до 75 км

Из результатов работы большой интерес представляет распределение скоростей на субмеридиональном профиле 1992 года, длина которого составляет 1100 км (рис 3). В направлении СЗ ЮВ профиль пересекает такие основные тектонические структуры как юг докембрийской Сибирской платформы, кайнозойская Байкальская рифтовая зона, среднепалеозойская раннемезозойская активная окраина Сибирского континента, Монголо-Охотский раннемезозойский складчатый пояс и Монголо-Северокитайский континент (Монгольские палеозоиды) (Zorin et al., 2002). Обращает на себя внимание значительное усложнение подстанционных скоростных моделей при переходе от Сибирской платформы к Байкальской рифтовой зоне. Обратная тенденция наблюдается в распределении скоростей при переходе от рифта к юго-восточной части профиля, более пассивной в тектоническом отношении.

Как отмечалось, обмены PS на подошве коры хорошо проявляются на приемных SV-функциях большинства станций профиля, однако амплитуды обменов малы в Байкальской рифтовой зоне, где может существовать переходная зона между корой и мантией (Пузырев, 1993). Соответственно характеру приемных функций на скоростных разрезах коромантийная граница под станциями Байкальской рифтовой зоны выражена слабее, чем под другими тектоническими областями (Артемьев и др., 2002, Zorin et al., 2002)

Толщина коры варьирует от 37 до 40 км под Сибирской платформой (станции 04 - 11). Она примерно равна 34 км для станции 12, расположенной на северо-западной стороне озера Байкал, скоростная модель которой вследствие сейсмического сноса отражает структуру коры под озером. Толщина коры резко увеличивается до 51 км в модели для станции 24 на юго-восточном берегу Байкала, которая формируется структурой под хребтом Хамар Дабан. Максимальная толщина коры (55 км) определена в окрестности станции 21 (осевая часть хребта Хамар Дабан). Мощность земной коры постепенно уменьшается до 45 км под станциями 83 и 84. Под остальной юго-восточной частью профиля глубина Мохы варьирует от 44 до 48 км. Вообще,

кора под складчатыми районами Сибири и Монголии во всех полученных моделях толще чем под Сибирской платформой. Вышеприведенные значения мощности коры согласуются с данными глубинного сейсмического зондирования для российской части профиля (Крылов и др. 1981; Пузырев 1993).

Низкоскоростные слои, идентифицируемые как минимумы скорости на сглаженных скоростных моделях, присутствуют в земной коре почти под всеми станциями. Уменьшение скорости поперечных волн в низкоскоростных слоях относительно окружающей среды варьирует от 0,1 до 0,4 км/с. Принимаются во внимание только низкоскоростные слои с толщиной не менее трех вертикальных шагов модели. Эти слои могут быть прослежены от станции к станции без затруднения, если их глубины под соседними пунктами наблюдения отличаются друг от друга незначительно. Для корреляции низкоскоростных слоев в более сложных случаях могут быть использованы геологические и гравиметрические данные, как это сделано Ю. А. Зориным с соавторами (Zonn et al., 2002). На двумерной модели (рис. 3) можно выделить 11 низкоскоростных слоев. Для большинства слоев намечены лишь их средние линии. Верхние и нижние границы даны только для более уверенно выделяющихся слоев, толщина которых была использована для дальнейшей геолого-геофизической интерпретации.

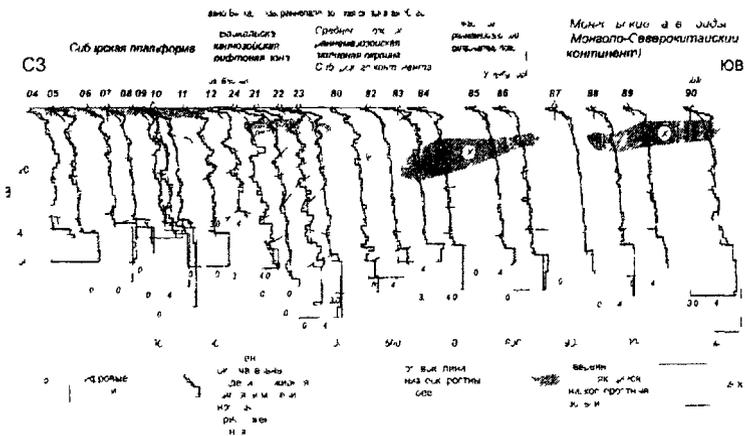


Рис. 3. Сводный скоростной разрез по станциям профиля 1992 года с выделяемыми зонами и осями слоев пониженной скорости (согласно публикации Zonn et al., 2002).

В окрестностях Южного Байкала, где сейсмические станции были сравнительно равномерно распределены по площади с расстояниями между ними от 20 до 50 км (рис. 1), удалось построить трехмерную модель сейсмической структуры коры и верхов мантии до глубины 75 км (Артемьев и др. 2004). Разрешение трехмерной модели по горизонтали соответствует расстоянию между станциями и в среднем равно 30 км. Разрешение по вертикали (с учетом сглаживания) примерно равно удвоенной толщине

элементарных слоев модели, те 2 км в большей части коры и непосредственно под корой и 10 км в мантии. Обработка подстанционных распределений скорости сплайном минимальной кривизны в пакете программ Paradigm Geophysics (PG) дала возможность представить результаты в наглядном виде. Совокупность горизонтальных срезов составляет объем прямоугольной пластины с размерами 400x400x75 км.

Объемные изображения были получены как для абсолютных значений скорости, так и для скоростных аномалий (dV/V) (рис.4), рассчитанных в процентах по отношению к референтному скоростному разрезу. В референтной модели до глубины 40 км принят тот же усредненный для рассматриваемого региона скоростной разрез коры по данным ГСЗ (Пузырев, 1993), который использовался в качестве начального приближения для процедуры инверсии. В интервале глубин от 40 км до 75 км наши результаты сравниваются со средней моделью $V_s(H)$ по Земле IASP91 (Kennet and Engdahl, 1991). Изображения в виде аномалий по отношению к средней для соответствующих глубин скорости из-за 40-километровой референтной коры дают "ложные" аномалии-положительные под утоненной корой и отрицательные в низах утолщенной коры (рис.4). Однако в целом на них более контрастно проявляется чередование слоев с относительно пониженной и относительно повышенной скоростями.

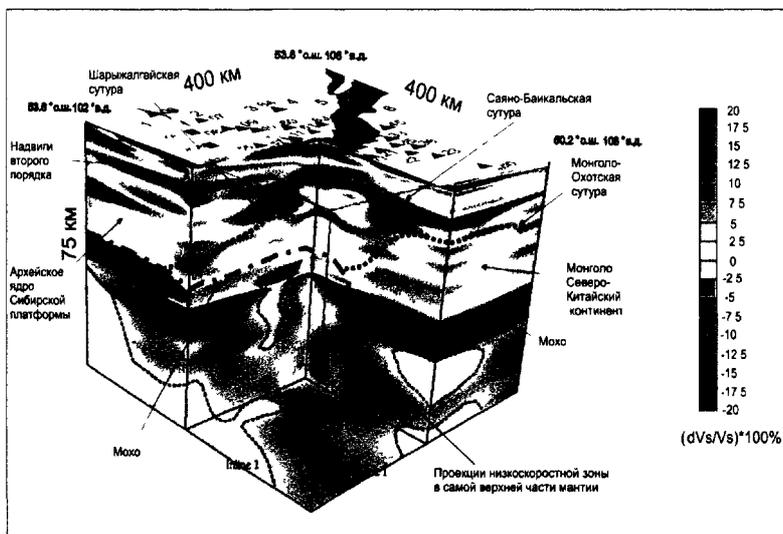


Рис 4 Геологическая интерпретация трехмерной модели скоростных аномалий S-волн

Начиная с поверхности Земли, скорости растут неравномерно, обнаруживая слоисто-блоковую структуру с явно выраженными слоями пониженной скорости. Подошва коры ограничивается на северо-западе глубиной 36-37 км, при этом четко проявляется контрастность коро-мантийной границы. Южнее, под Саянами и Тункинскими гольцами, подошва коры

заглубляется примерно до 50 км. При приближении к Байкалу глубина подошвы поднимается, принимая минимальные значения (34-36 км) под Байкальской впадиной. Южнее можно видеть переход от скоростной структуры под озером Байкал к скоростной структуре под хребтами Хамар-Дабана. Модель среды под Байкалом по сравнению с окружающими районами, является более сложной на всех глубинах. В коре здесь нет протяженных слоев.

Явным недостатком объемной модели является высокоскоростная аномалия в первых километрах под Байкальской впадиной. Причиной тому являются интерполяция значений скорости полученных под береговыми станциями, близвертикальные сейсмические лучи и, как упоминалось выше, распределение сейсмичности на Земле, обусловившее используемый набор землетрясений преимущественно юго-восточного направления. Для больших глубин объемной модели в Байкальской рифтовой зоне и сопредельных районах краевой части Сибирской платформы отмечается закономерность в распределении скоростей, сходная с полученной из анализа результатов ГСЗ (Суворов и др., 1999, Suvorov et al., 2002) начиная с глубины 15 км скорости под Байкальской впадиной и юго-восточнее ее выше, чем на юге Сибирской платформы.

Вертикальные сечения прямоугольной пластины дают возможность получить более детальное и наглядное представление о распределении скорости сейсмических S волн в самой верхней мантии этого интересного в геодинамическом плане района Земли. Неоднородность мантии хорошо видна в абсолютных скоростях, но еще более четко проявляется в аномалиях скоростей (рис 4). Скоростное распределение в этом небольшом объеме мантии очень сложное, величина аномалий варьирует от +5 до -5% относительно стандартной модели Земли IASP91. Положительные значения аномалии соответствуют Сибирской платформе. Южнее характер аномалий становится мозаичным. Устойчивые отрицательные значения проявляются в южной части исследуемого объема. Обнаруживается сходство подкоровых скоростных аномалий, полученных методом receiver function, с результатами совместных исследований методами глубинного сейсмического зондирования и сейсмологии местных землетрясений (Крылов и др., 1981). Несмотря на 30-градусное отклонение друг от друга осей сравниваемых сечений Байкальской рифтовой зоны, в диапазоне глубин 40-75 км рассматриваемого объема наблюдается достаточно четкое соответствие конфигураций выявленных различными методами низкоскоростных аномалий и их выклинивание с глубиной. Максимальные значения отрицательной скоростной аномалии находятся под Тункинской впадиной и юго-восточнее Байкальской впадины, что согласуется также с данными томографии по объемным волнам (Мордвинова и др., 2000, 2003). Конфигурация аномалий в целом не противоречит гипотезе мелкомасштабной конвекции в верхах мантии (Gao et al. 2003).

В шестой главе показано, что построенные по результатам инверсии скоростные модели содержат информацию, связанную со сложным геологическим строением региона, обусловленным всей историей его формирования. Связь поверхностных геологических структур с распределением сейсмических скоростей под ними прослеживается до значительных глубин.

что четко проявляется на горизонтальном сечении объемной модели на глубине 39 км Именно на этой глубине под Сибирской платформой и озером Байкал уже начинается мантия, где скорости выше, а южнее, под складчатыми областями низкими скоростями проявляет себя утолщенная кора

Наиболее детально с учетом существующей геологической и геофизической информации коллективом авторов проанализированы относящиеся к земной коре результаты по субмеридиональному профилю, секущему Сибирскую платформу, Байкальский рифт и разновозрастные тектонические районы Монголии (Zonn et al, 2002) Низкоскоростные слои найдены методом функции приемника (receiver function) на различных глубинах во всех тектонических провинциях, пересекаемых профилем Хотя наклоны слоев не превышают 10 - 15°, некоторые из них на протяжении двух и более сотен километров пересекают различные уровни глубин коры Автор разделяет мнение Ю А Зорина, что такие особенности строения коры не могут быть связаны с дегидратацией пород, вызванной определенными Р-Т условиями, изменяющимися с глубиной (Zorin et al, 2002) Можно предположить, что слоистость сейсмической структуры отражает неоднородность земной коры, вызванную различными геологическими процессами (в основном тектоническими) в различные периоды коровой эволюции

Как уже отмечалось выше, исследованиями ГСЗ низкоскоростные слои выделены только в Байкальской рифтовой зоне (на платформе и в Забайкалье такие слои не выделены, а в Монголии ГСЗ не проводилось) По видимому, различие в результатах ГСЗ и receiver function объясняется тем, что основная часть низкоскоростных слоев представляет собой мощные зоны милонитов, связанные с пологими надвигами Переориентация кристаллов минералов (в основном амфиболов и слюды) при образовании зон милонитов происходит в соответствии с направлением сдвиговых течений Такая переориентация приводит к сейсмической анизотропии, которая, судя по изучению образцов милонитов, может превышать 10% (Christensen, 1965, Rabbel, 1994) При этом вектор минимальной скорости направлен ортогонально к полосчатости милонитов Зоны милонитов при их субгоризонтальном залегании должны выделяться как слои пониженной скорости только в волнах с субвертикальными направлениями лучей Именно такие волны от удаленных сейсмических событий и используются в методе приемной функции В модификациях метода ГСЗ, выполненных в Восточной Сибири, используются преломленные и закритические отраженные волны, лучи которых значительно отклоняются от вертикали в земной коре Поэтому анизотропные зоны милонитов по данным ГСЗ могут либо вообще не выделяться, либо даже отражаться как слои повышенной скорости (Зорин и др, 2002, Zorin et al, 2002) Видимо, методом ГСЗ могут выделяться только мощные сильно обводненные зоны тектонитов

На основе совместного анализа результатов метода функции приемника, геологических и гравиметрических данных (Зорин и др, 1994, Zonn 1999 Zonn et al, 2002) вдоль сейсмического профиля построен интерпретационный разрез земной коры, на котором отображены крупномасштабные надвиги, отражающие геодинамическую историю региона Эти надвиги соответствуют

известным шовным зонам (сутурам) Саяно-Байкальской, Шарыжалгайской и Монголо-Охотской Амплитуды указанных надвигов оценены в первые сотни километров Совместный анализ данных по профилю позволил, с одной стороны дать геологическую интерпретацию найденного распределения скорости поперечных сейсмических волн, с другой - более уверенно картировать структурные неоднородности в земной коре, наличие которых предполагалось ранее на основе геологических и гравиметрических данных.

Автором предпринята попытка дать геологическую интерпретацию трехмерной скоростной модели (Артемьев и др., 2004). На трехмерной модели аномалий сейсмических скоростей (рис. 4) отражены фрагменты тех же крупных надвигов, что и на двумерной модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе установлена применимость метода приемной функции (receiver function P-to-S) для детального изучения коры и самой верхней мантии в районе регистрации телесейсмических событий. Численным моделированием показано, что метод приемной функции даже при сравнительно узком диапазоне частот наблюдаемых колебаний, способен обнаружить слои пониженной скорости в земной коре, несмотря на то, что соответствующие им вступления обменных волн на сейсмограммах практически не разделяются из-за взаимного наложения фаз.

Основным результатом работы являются модели распределения скорости поперечных сейсмических волн в земной коре и в верхах мантии под южной частью **Сибирской платформы**, под **Саяно-Байкальской складчатой** областью, в пределах которой расположена Байкальская рифтовая зона, и под складчатыми областями Западного Забайкалья и Центральной Монголии. Расположение сейсмических станций позволило построить двумерную модель для перечисленных выше регионов и трехмерную модель для окрестностей Южного Байкала. Детальность моделей по латерали, соизмеримая с расстоянием между сейсмостанциями, дает возможность соотносить особенности скоростного строения с тектоническими структурами.

Построенные модели подтвердили некоторое утонение земной коры под Байкальской впадиной по сравнению с корой сопредельных районов. Слои пониженной скорости обнаружены как под Байкальской рифтовой зоной, так и под складчатыми областями Забайкалья и Монголии, а также под Сибирской платформой. Комплексирование полученных результатов с геологическими данными, а также с данными гравиметрии позволило прийти к заключению, что основная часть слоев пониженной скорости в земной коре Восточной Сибири и Монголии соответствует пологим мощным зонам милонитов, связанным с крупными надвигами. Зоны милонитов обладают сейсмической анизотропией и проявляются как слои пониженной скорости только в волнах, пересекающих слои в направлении близком ортогональному. Следовательно, метод функции приемника, в котором используются волны землетрясений с траекториями лучей в районе регистрации близкими к вертикали, может являться хорошим инструментом для изучения тектоники складчатых областей

Комплексная интерпретация геофизических данных с использованием результатов настоящей работы, позволила разработать концепцию

существования на юге Сибири и в Монголии крупно-амплитудных надвигов, образовавшихся на протяжении тектонической истории региона в результате взаимодействия островодужных террейнов, микроконтинентов и субконтинентов. Эти надвиги соответствуют сутурным зонам и их горизонтальные амплитуды оцениваются первыми сотнями километров. Предполагается, что Саяно-Байкальский надвиг перекрывает осадочный (возможно, нефтегазоносный) чехол Сибирской платформы на расстояние около 120 км (Zorin et al., 2002). Монголо-Охотская сutura контролирует распределение золоторудных месторождений в Забайкалье (Zorin et al., 1999). Таким образом, наличие низкоскоростных слоев, связанных с крупно-амплитудными надвигами, может служить признаком перспективности данной территории на месторождения полезных ископаемых и рекомендацией к более детальным исследованиям сутурных зон методом МОВ ОПТ.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Артемьев А.А., Зорин Ю.А., Мордвинова В.В. Слои пониженной сейсмической скорости в земной коре Байкало-Монгольского региона по данным метода Receiver function // Труды третьей Байкальской молодежной школы-семинара (Иркутск-Черноруд, 21-25 августа 2001 г.) под ред. проф. А.Г. Дмитриева. - Иркутск: Издательство ИрГТУ, 2002. - С. 150-159.

2. Yu.A. Zorin, V.V. Mordvinova, E.Kh. Turutanov, V.G. Belichenko, A.A. Artemyev, G.L. Kosarev, S.S. Gao Low seismic velocity layers in the Earth's crust beneath Eastern Siberia (Russia) and Central Mongolia: receiver function data and their possible geological implication. //Tectonophysics, (2002), 359/3-4, P. 307-327.

3. Мордвинова В.В., Винник Л.П., Зорин Ю.А., Косарев Л.Г., Треусов А.В., Орешин С.И., **Артемьев А.А.** Телесеismicкая томография и тонкая скоростная структура в Восточной Сибири и Центральной Монголии по телесеismicким записям объемных волн // Тезисы III Российско-Монгольской конференции по астрономии и геофизике (29.10-2.11 Иркутск), 2002. С.48-49.

4. **Артемьев А.А.**, Мордвинова В.В., Зорин Ю.А. Исследования сейсмической структуры земной коры в южной части Байкала методом RECEIVER FUNCTION // Тезисы докладов Первой Сибирской международной конференции молодых ученых по наукам о Земле (4-6 декабря, 2002) - Новосибирск, 2002. С. 12-13.

5. **Артемьев А.А.** Мордвинова В. В. Турутанов Е. Х. Трехмерная модель скоростной структуры на юге озера Байкал и смежных территориях по данным обменных волн // ВНКСФ-9. Сборник тезисов, информационный бюллетень - Красноярск, 2003. Т. 2. С 870-871.

6. **Артемьев А.А.**, Мордвинова В.В., Зорин Ю.А. Исследование скоростной структуры коры на юге Байкальской рифтовой зоны по данным обменных волн. // Четвертая Уральская молодежная научная школа по геофизике Сборник учебно-научных материалов. - Пермь, 2003. С 6-8.

7. Артемьев А.А., Зорин Ю.А., Мордвинова В.В. Исследования земной коры в районе Байкала методом функции приемника // Труды четвертой

Байкальской молодежной школы семинара (Иркутск Черноруд, 5-9 сентября 2002) под ред. проф. А. Г. Дмитриева - Иркутск: Изд-во ИргТУ, 2004. С. 79-84.

8 Мордвинова В. В., **Артемьев А. А.** Результаты и перспективы телесеismicических исследований в Восточной Сибири и Центральной Монголии // *Geophysics and Astronomy* No 2 2004. P. 55-59.

9 Deschamps A., Mordvinova, V., Dugarmaa I., Deverchere J., Perrot, J., Ulznbat M., **Artemyev, A.**, Urtnassan H., Bayan J., Bayarsaikhan S. The MOBAL 03 experiment: a seismological lithospheric transect from South Siberia to Gobi Altai range // *Geophysical Research Abstracts European Geosciences Union*, 2004. 6(06196). SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU04-A-06196.

10 **Артемьев А. А.**, Мордвинова В. В., Клыкова В. Д., Гао С. С., Дешамп А. 3D модель распределения скорости на юге Байкальской рифтовой зоны по обменным P-S волнам // *Материалы научного совещания «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)»* Иркутск, 2004. С. 23-27.

Подписано к печати 18.04.2005. Формат 60x84 1/8

Печать RISO. Уч. изд. л. 1,2; печ. л. 1,4

Тираж 100 экз. Заказ № 403

Отпечатано типографией ИЗК СО РАН

664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128

25.00

19 МАЙ 2005

247
10