

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ОРДЕНА ЛЕНИНА ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ им. О. Ю. ШМИДА

На правах рукописи

УДК 551.15:550.344.64

АВETИСЯН Рубен Амбарцумович

СТРУКТУРА ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНЫ МАНТИИ
ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ДЛИННОПЕРИОДНЫХ
ОБМЕННЫХ ВОЛН PS

ОГ.04.12 - Геофизика

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 1986

Библиотека
Института
геологических наук
от автора
26.12.1996г.

Работа выполнена в Ордена Ленина Институте физики Земли им. О. Ю. Шмидта АН СССР и в Ордена Трудового Красного Знамени Институте геофизики и инженерной сейсмологии АН АрмССР.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
ст. н. с.

Д. П. ВИННИК

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
ст. н. с., профессор

А. Л. ЛЕВШИН

кандидат физико-математических
наук, ст. н. с.

С. А. ФЁДОРОВ

Ведущая организация: Физический факультет ЛГУ
им. А. А. Жданова

Защита состоится "29" мая 1986 г. в 14⁰⁰ часов
на заседании специализированного Совета по геофизике
КОО2.08.04 при Институте физики Земли им. О. Ю. Шмидта АН СССР.
Адрес: 123810, ГСП Москва, Д-242, Б. Грузинская ул., д. 10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
физики Земли им. О. Ю. Шмидта АН СССР.

Автореферат разослан "28" апреля 1986 г.

Ученый секретарь
специализированного Совета
кандидат геол.-мин. наук

М. В. НЕВСКИЙ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

1936

Актуальность исследования определяется необходимостью расшифровки структуры переходной зоны мантии (на глубинах 400-900 км) для понимания состава, эволюции и динамики мантии в целом. Последние годы отмечены очень быстрым развитием техники физического эксперимента при давлениях порядка сотен килобар и температурах до 2000°C . Эти успехи позволяют воспроизводить и измерять в лаборатории параметры пород, находящихся на глубинах порядка сотен километров от поверхности Земли. Новые лабораторные данные могут продвинуть исследования переходной зоны при наличии столь же детальных и надёжных сейсмических данных о её структуре. Однако в области сейсмических исследований переходной зоны прогресс значительно меньше. Сейсмические методы, которые сложились 10-20 лет тому назад, сейчас исчерпали свой первоначальный потенциал, и их повторное применение пусть даже к более качественным наблюдениям добавляет очень мало к тому, что уже известно. Например, классический метод рефрагированных волн в принципе не позволяет измерять глубину границ в переходной зоне с точностью выше нескольких десятков километров или выделять латеральные неоднородности с масштабом около 1000 км или менее. Так же нереальна возможность измерения этим методом градиентов скорости в слоях мощностью горстка нескольких десятков километров. Эти соображения заставляют искать и использовать новые источники сейсмической информации.

Целью работы является получение принципиально новой информации о структуре переходной зоны с помощью длиннопериодных обменных волн PS, сформированных на скоростных неоднородностях этой зоны. На пути к достижению этой цели ставятся следующие задачи:



1. Обоснование метода выделения длиннопериодных обменных волн PS , его оптимизация и совершенствование.

2. Применение этого метода к записям ряда сейсмических станций, расположенных в различных сейсмогеологических условиях, выяснение возможности выделения обменных волн, связанных с границами в переходной зоне, по данным одной сейсмической станции.

3. Интерпретация наблюдений длиннопериодных обменных волн: определение глубины и тонкой скоростной структуры неоднородностей переходной зоны.

Научная новизна. Идея использования обменных волн PS для изучения коры и верхней мантии в принципе не нова. В СССР существует и широко применяется при региональных исследованиях так называемый Метод Обменных Волн Землетрясений (МОВЗ); ему посвящена обширная литература. Однако основные положения и результаты применения МОВЗ не раз подвергались серьезной критике. Существо этой критики заключается в том, что в МОВЗ не решена основная задача: выделение обменных волн на фоне интенсивного шума, сформированного волнами другой природы. Новым элементом метода, применяемого в нашей работе, является последовательное решение задачи выделения и идентификации обменной волны на фоне помех. Основной предпосылкой для решения этой задачи является избыточность информации, накапливаемой в процессе многолетней работы сейсмической станции. Первый успешный эксперимент по выделению мантийных обменных волн был выполнен Л.П.Винником по данным сейсмической группы НОРСАР. Однако метод не был полностью обоснован, его разрешающая способность не была исследована, возможность применения к данным одиночных станций не выяснена. Эти задачи решены при активном учас-

тии автора данной диссертации.

В процессе обоснования метода был выполнен большой объём расчётов кинематики и динамики обменных волн. Подобные вопросы неоднократно обсуждались и другими авторами. Однако рассмотрение было ограничено определёнными задачами или определёнными моделями среды, и полученные результаты оказалось трудно использовать для решения других задач и исследования другой среды. Новым элементом нашего анализа является исследование кинематики и динамики обменных волн применительно к новой задаче: выделению, идентификации и интерпретации наблюдений длиннопериодных обменных волн PS , возникающих в переходной зоне мантии.

Основные результаты работы получены при практическом применении метода к записям нескольких станций в различных районах мира. Все эти результаты являются новыми.

Автор защищает:

1. Исследование вопросов кинематики и динамики мантийных обменных волн PS применительно к задаче их выделения, идентификации и интерпретации.

2. Анализ разрешающей способности метода выделения обменных волн и исследование вопросов оптимального выбора параметров в процедуре выделения.

3. Доказательство возможности выделения мантийных обменных волн по записям одной сейсмической станции; результаты практического выделения этих волн на записях ряда сейсмических станций.

4. Методику интерпретации наблюдений обменных волн и результаты её применения: значительно более точную, чем ранее

оценку нормальной глубины перехода от верхней мантии к нижней, которая отличается на 20-30 км от значений, принятых в последних среднемировых моделях; полученный впервые профиль градиента скорости поперечных волн в пределах этого перехода; полученные впервые свидетельства значительных латеральных вариаций структуры переходной зоны с горизонтальным масштабом порядка 500 км в тектонически активном районе.

Практическая значимость работы. Результаты исследования структуры переходной зоны представляют важный фактический материал для суждения о составе вещества и процессах в мантии. Методические результаты работы могут быть использованы для дальнейшего картирования неоднородностей литосферы и верхней мантии.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на 21 Генеральной Ассамблее МАСФНЗ, Канада, 1981 г.; на совместном заседании Европейского геофизического общества и Европейской сейсмологической Комиссии, Лидс 1982 г.; на 28 Генеральной Ассамблее МГТС, Гамбург, 1983 г.; на семинарах отдела сейсмологии ИФЗ АН СССР. По теме диссертации опубликовано 10 работ.

Объём работы и дополнительные сведения. Диссертация состоит из Введения, трёх глав, Заключения и списка использованной литературы и содержит 152 страницы машинописного текста, 50 иллюстраций и 10 таблиц. Список использованной литературы содержит 121 источник, в том числе 87 - на иностранных языках.

Работа не могла бы быть выполнена без большой помощи научного руководителя, доктора физико-математических наук Л.П.Винника - заведующего лабораторией общей сейсмологии ИФЗ

АН СССР и сотрудников лаборатории: Н.Г.Михайловой, Г.Л.Косарева, А.В.Треусова, Л.И.Макеевой, а также сотрудника отдела вычислительной геофизики Л.И.Ратниковой. Всем им автор выражает самую глубокую признательность.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава I. Структура переходной зоны мантии

Глава представляет обзор литературных данных о структуре переходной зоны, геофизических проблемах исследования этой зоны.

Существование особой зоны мантии, в которой скорость упругих волн возрастает с глубиной значительно быстрее, чем в остальной части мантии, стало очевидным к концу 40-х годов, когда Гутенберг и Джеффрис закончили анализ больших массивов данных о временах пробега P - и S -волн. На этом этапе на глубине около 400 км была обнаружена сейсмическая граница, ставшая известной как "20-градусная" граница раздела.

Следующий этап сейсмических исследований переходной зоны, который начался в 60-х годах, ознаменовался открытием на глубине 600-700 км второй сейсмической границы (Голенецкий и Медведева, Лукк и Нерсесов, Кардер, Ниази и Андерсон). В настоящее время сейсмические исследования структуры переходной зоны находятся на новом этапе, отличительной особенностью которого является распространение цифровой сейсмической записи с широким частотным и динамическим диапазоном. Цифровая запись расширяет возможности выделения на сейсмограммах слабых по отношению к волнам-помехам, но геофизически информативных фаз.

Как первые сейсмические данные о структуре переходной зоны, так и значительная часть последующих, получены в результате построения и обращения годографов рефрагированных волн. Следующий тип сейсмических данных, оказавший влияние на совре-

менные представления о структуре переходной зоны, — волны типа $P'dP'$ (отражённые от внутренней стороны границ в переходной зоне волны P'). Волны, отождествляемые с $P'dP'$ иногда наблюдаются на записях короткопериодных сейсмографов на расстояниях около 60° . Градиентная зона, способная порождать отражённые волны значительной амплитуды при длине волны около 10 км, должна иметь мощность не более 3 км. Вывод о резкости границы на глубине 600–700 км широко используется в дискуссии о её природе. Последнюю группу данных образуют результаты, полученные с помощью обменных волн PS и SP .

При систематизации опубликованных данных обнаруживается большой (порядка нескольких десятков километров) разброс оценок глубины границ в переходной зоне. Одной из основных причин разброса является принципиальная неоднозначность обращения годографа рефрагированной волны. Особенно велика неопределённость в оценке глубины второй границы, расположенной в интервале 600–700 км. Так, например, при использовании одного и того же набора данных (записей больших взрывов на территории СССР, сделанных группой НОРСАР) различными авторами были получены оценки глубины от 640 км до 720 км. Точно так же наблюдения рефрагированных волн дают очень ограниченную информацию о градиенте скорости в пределах этого перехода. Органическим недостатком наблюдений обсуждаемого типа является также их низкая разрешающая способность по латерали.

Отражения от внутренней стороны границ (фазы типа $P'dP'$ и PdP) в принципе могут содержать важную информацию о глубине и тонкой структуре соответствующих переходов, однако практическая реализация этой возможности связана с серьёзными проблемами, главная из которых связана с трудностью однозначного отожд-

дествления отражённых волн этого типа среди волн совершенно иной природы. В частности, было показано (Винник, 1974), что многие фазы, интерпретировавшиеся как $P'dP'$, в действительности сформированы случайным рассеянием волн P' на поверхности Земли и в приповерхностном слое. Клири (1981) показал, что рассеяние в области каустики на внутренней стороне границы ядро-мантия формирует фазы, которые имеют те же времена пробега и кажущиеся скорости, что и волны, интерпретируемые как отражения на глубине 650 км.

Проблема интерпретации предвестников волны S , часто интерпретируемых как обменные волны SP , имеет много общего с проблемой фаз PdP с той разницей, что вопрос о природе шума, предваряющего волну S , гораздо менее изучен, а полученные выводы о свойствах границ обмена имеют гораздо меньшее значение. Что касается вопросов выделения и интерпретации обменных волн PS , то им посвящена основная часть данной диссертации. В целом, даже краткий обзор сейсмических данных и вопросов их интерпретации показывает сложность проблемы сейсмического исследования структуры переходной зоны.

Представление о зоне высокого градиента скорости на глубинах 400-900 км как зоне фазовых переходов начало формироваться после того, как Бернал в середине 30-х годов предположил, что оливин с ростом давления должен перейти в более плотную модификацию типа шпинели. В 50-х годах Ф.Берч и В.А.Магницкий независимо предположили, что в зоне фазовых переходов с ростом давления должен происходить распад оливина на окислы с более плотной упаковкой. К концу 50-х годов техника эксперимента при высоких давлениях достигла такого уровня, что Рингвудом была синтезирована шпинелевая модификация оливина, а в 1961 г. Сти-

шов и Попова синтезировали новую плотную модификацию кварца (стишовит).

В настоящее время широким признанием пользуется пиролитовая модель мантии, основными компонентами которой являются оливиновая и пироксено-гранатовая. Оливин при давлениях и температурах, свойственных глубинам около 400 км, переходит в фазу β -шпинели, которая в дальнейшем (на глубинах около 500 км) переходит в γ -шпинель. Насколько можно судить по имеющимся данным, отождествление границы на глубине 400 км с фазовым переходом оливин- β -шпинель представляется достаточно правдоподобным. Далее при давлениях, характерных для глубин 600-700 км, шпинель распадается на магнезиовюстит и перовскит. Это превращение представляется одним из вероятных кандидатов для объяснения второй сейсмической границы. В пироксено-гранатовой компоненте при давлениях, характерных для переходной зоны, происходит серия фазовых переходов, завершающихся переходом из фазы ильменита в фазу перовскита на глубине около 600 км.

В последние годы резко возрос интерес к вопросу о природе второй (на глубине 600-700 км) сейсмической границы. Неоднократно приводились доводы в пользу изменения на этой границе химического состава. Одним из основных аргументов при этом являются сейсмические данные о резкости границы. Эти данные, однако, нельзя считать вполне надежными (см. выше). Кроме того возможность образования резкой границы не противоречит теоретической фазовой диаграмме мантийных силикатов (О.Л.Кусков и др., 1983). Вопрос о природе границы имеет первостепенную важность при решении более широких проблем состава, эволюции и современной динамики Земли. Если граница сформирована фазовым переходом, то она, скорей всего, не представляет препятствия для об-

мена веществом между верхней мантией и нижней. Если же на границе в результате изменения химического состава плотность возрастает на несколько процентов, то этого достаточно, чтобы прервать сообщение между двумя частями мантии. В результате различные выводы о природе границы предполагают, как следствие, различную геологическую историю Земли.

Глава 2. Метод выделения обменных проходящих волн PS

В первом разделе главы рассматриваются вопросы кинематики и динамики мантийных обменных волн PS, необходимые для обоснования метода их выделения. Во втором разделе излагается метод выделения. В третьем разделе обсуждаются вопросы оптимального выбора параметров в процедуре выделения.

В разделе, посвященном вопросам кинематики, дается вывод приближенной формулы для времени запаздывания обменной волны PS по отношению к волне P. Эта формула имеет вид:

$$t_{PS} = \int_{z_c}^{z_0} [\nu_s(z)^2 - p^2 z^{-2}]^{1/2} dz - \int_{z_c}^{z_0} [\nu_p(z)^2 - p^2 z^{-2}]^{1/2} dz \quad (1)$$

где ν_p и ν_s - скорости распространения волн P и S, z_0 - радиус поверхности наблюдений, z_c - радиус границы обмена, z - текущий радиус, p - лучевой параметр. Численный анализ формулы (1) показывает, что t_{PS} существенно зависит от лучевого параметра p и эта зависимость усиливается с ростом глубины границы обмена. В частности при изменении эпицентрального расстояния от 37° до 104° и при глубине обмена 700 км различие значений t_{PS} достигает 10 с (при больших расстояниях t_{PS} меньше). Зависимость t_{PS} от эпицентрального расстояния является одним из диагностических факторов при выделении обменных волн.

Одной из основных помех при выделении мантийных обменных волн являются обменные волны, претерпевшие многократные отра-

жения в коре. Из них наибольшей интенсивностью характеризуются волны, претерпевшие один обмен (отражение) на свободной поверхности и один обмен (отражение) на подошве коры. Показано, что если у однократных волн t_{PS} убывает с увеличением Δ , то у многократных оно растёт. Это обстоятельство облегчает выделение однократных обменных волн мантийного происхождения.

Анализ приближённого выражения для амплитуды обменной волны (Аки и Ричардс, 1983) показывает, что амплитуда обменной волны пропорциональна скачку скорости поперечных волн на границе, практически не зависит от скорости продольных волн и плотности, убывает с ростом эпицентрального расстояния. Численное моделирование методом Томсона-Хаскелла показывает, что при формировании в градиентном слое амплитуда обменной волны слабо (по сравнению с отражённой волной) зависит от мощности слоя (при увеличении мощности слоя от 0 до длины поперечной волны амплитуда обменной волны убывает вдвое); форма колебаний в обменной волне, сформированной в градиентном слое, в широком диапазоне эпицентральных расстояний близка к форме колебаний в P -волне.

Метод выделения обменных волн использует различную зависимость t_{PS} от эпицентрального расстояния при различных глубинах обмена, отличие поляризации волны PS от волны P , сходство формы колебаний в волнах PS и P , слабую зависимость формы колебаний от эпицентрального расстояния. Первой процедурой при выделении обменной волны является частотная фильтрация. Далее выполняется поворот осей, необходимый для проецирования трёхкомпонентной записи на ось N , обеспечивающую наивысшее отношение сигнал/шум при условии, что сигналом является обменная волна, а помехой - волна P . Эта ось перпендику-

лярна к главному направлению смещений в Р-волне $\mathcal{L}$ и лежит в вертикальной плоскости, соединяющей источник и приёмник. Главное направление смещений в Р-волне определяется анализом ковариационной матрицы, в которой роль случайных величин играют вертикальная и радиальная компоненты записи Р-волны.

Следующей процедурой является стандартизация Н-компонент ряда записей одной и той же станции, устраняющая те различия между записями, которые возникают из-за различий в магнитуде и функции в источнике. Стандартизованная $\hat{H}$ -компонента имеет вид:

$$\hat{H}(t) = \int_{t_1}^{t_2} H(t+\tau) \mathcal{L}_p(\tau) d\tau / \int_{t_1}^{t_2} [\mathcal{L}_p(\tau)]^2 d\tau \quad (2)$$

где t_1 и t_2 - соответственно, начало и конец основной части записи Р-волны, τ - переменная интегрирования. Запись волны превращается преобразованием (2) в свою автокорреляционную функцию. Максимальное значение этой функции равно отношению амплитуд волн PS и Р. Значение t , соответствующее максимуму, равно временному интервалу между вступлениями фаз PS и Р. Последней операцией обработки совокупности записей является суммирование стандартизованных Н-компонент различных землетрясений с различными временными сдвигами и, в общем случае, весовыми коэффициентами

$$F(t, h) = \sum_{i=1}^N m_i \hat{H}_i(t + \delta t_i(h) - \delta t_0(h)) \quad (3)$$

где N - число суммируемых записей, m_i - весовой коэффициент

для i -ой записи, $\sum_i m_i = 1$, $\delta t_i(h)$ - величина t_{ps} , вычисляемая по формуле (I) для глубины h при значении лучевого параметра, соответствующем продольной волне i -го землетрясения, δt_0 - величина t_{ps} для той же глубины при референтном значении лучевого параметра, принятом равным 6,4 с/град.

Эффект процедуры (3) удобно рассматривать с помощью характеристики фазирования, определяемой следующим образом. Рассматривается сигнал - обменная волна вида $\cos \omega t$ с глубиной обмена h_1 . Для i -го землетрясения нормированная амплитуда сигнала равна a_i . Характеристика фазирования имеет вид:

$$\Phi(\omega, h_1, h) = \frac{\sum_{i=1}^N m_i a_i \cos\{\omega[\delta t_i(h) - \delta t_i(h_1)]\}}{\sum_{i=1}^N m_i a_i}$$

где h - пробная глубина (глубина фазирования), а δt_i - величина t_{ps} , вычисляемая по формуле (I). Величина $\Phi(\omega, h_1, h)$ равна 1,0 при $h_1 = h$ и показывает зависимость амплитуды сигнала с глубиной обмена h_1 от глубины фазирования h . Если помеха является обменной волной с глубиной обмена h и таким же распределением амплитуды как волна-сигнал, то значение $\Phi(\omega, h_1, h)$ даёт отношение сигнал/помеха при глубине фазирования h_1 . Показателем качества характеристики, предназначенной для выделения мантийных обменных волн, можно условно принять её значение при $h_1 = 400$ км и $h = 640$ км. Численные эксперименты показывают ухудшение разрешающей способности (увеличение $\Phi(\omega, 400, 640)$ при понижении частоты от 0,2 Гц до 0,05 Гц.

Рассматривается методика оптимального выбора весов m_i для выделения сигнала на фоне помех с наименьшей среднеквадратичной погрешностью. При исследовании результирующей системы

нормальных уравнений обнаружено, что при коррелированной помехе она плохо обусловлена, поэтому при обращении матрицы системы применяется регуляризация. Численными экспериментами показана возможность управлять видом характеристики фазирования при больших случайных флуктуациях амплитуды сигнала и помех.

Рассматривается вопрос о выборе оптимального частотного диапазона. Со стороны низких частот он ограничен значениями 0,05-0,07 Гц, при которых снижается избирательность характеристики фазирования. Со стороны высоких частот рабочий диапазон ограничивается эффектами рассеяния, поглощения, а также ошибками цифровки, если обрабатываются записи на фотобумаге; в сумме они определяют пороговое значение частоты как 0,2-0,5 Гц.

Глава 3. Результаты выделения мантийных обменных волн PS

Эта глава является центральной в работе. В ней приводятся результаты практического выделения мантийных обменных волн на ряде сейсмических станций и дается интерпретация полученных результатов.

Формулируются критерии отбора сейсмограмм. Интервал эпицентральных расстояний должен быть как можно более широким. За записью Р-волны длительностью не более 40-50 с должен следовать "спокойный" интервал, в котором амплитуда колебаний вертикальной компоненты не превышает 25% от максимальной амплитуды Р-волны. При оцифровке сейсмограмм, полученных на фотобумаге, амплитуда вертикальной компоненты записи Р-волны должна иметь амплитуду не менее 1 см.

Для группы НОРСАР обработаны записи 22 землетрясений с эпицентральными расстояниями от 36,6° до 104,3°. Анализ выполнен раздельно для частот около 0,1 Гц и около 0,2 Гц. В обоих диапазонах уверенно выделены обменные волны с глубинами обмена

около 400 и 650 км. Для первой волны значение t_{PS} в первом и втором частотном диапазоне равно 44,5 с, амплитуда равна, соответственно, 0,025 и 0,021. Для второй волны значение t_{PS} на частотах около 0,1 Гц равно 67,5 с, на частотах около 0,2 Гц - на 1 с больше; амплитуды в первом и втором диапазонах равны, соответственно, 0,037 и 0,021. Различия в значениях t_{PS} и амплитудах второй волны на частотах 0,1 Гц и 0,2 Гц в дальнейшем использованы для построения скоростной модели соответствующего перехода.

Для ЦСО Обнинск обработаны 14 записей длиннопериодных сейсмографов Кирноса в эпицентральной интервале от 53° до 81° . Записи оцифрованы с частотой 2,5 Гц, полученные числовые ряды обрабатывались с помощью гауссовского фильтра. Наилучшее отношение сигнал/помеха получено в частотном диапазоне 0,07-0,14 Гц. Частотный диапазон в окрестности 0,2 Гц не был использован из-за сильных микросейсмических помех. Уверенно выделена обменная волна с максимальной амплитудой (0,04) на времени 66,7 с. Более ранняя фаза с максимумом на времени 43,2 с выделена менее уверенно.

Последний эксперимент был выполнен по записям четырёх сейсмических станций в западных районах США: ALQ, DUG, GOZ и TUC. Анализировались записи длиннопериодных сейсмографов стандартизированной мировой сети, методика обработки которых практически не отличалась от применённой к данным ЦСО Обнинск. При обработке записей станций GOZ и TUC выяснилось, что их волновые поля похожи, поэтому в дальнейшем $\hat{N}$ -компоненты обеих станций (в общей сложности 25) суммировались совместно. При этом уверенно выделены две мантийные обменные волны, для одной из которых значение t_{PS} близко к 47 с, для второй - к 70 с.

На записях DUG выделяется единственная мантийная обменная волна со временем 46,0 с; волна со временем около 70 с не выделяется. Максимальное смещение в этом временном интервале составляет менее 0,01. Единственная уверенно идентифицируемая на записях ALQ мантийная обменная волна имеет время 57,0 с, соответствующая глубина обмена близка к 500 км. Характерные значения амплитуды выделенных фаз составляют 0,03-0,04, стандартная ошибка оценки амплитуды равна 0,007. Знаки смещения во всех случаях соответствуют обмену на границе высокоскоростной среды внизу и низкоскоростной - вверху. Результаты обработки записей станций на западе США наглядно свидетельствуют о существовании в переходной зоне значительных латеральных неоднородностей.

Глубину обмена для обменной волны можно найти, оценивая t_{PS} для ряда пробных значений глубины и сравнивая расчётные значения с наблюдаемыми. Значения V_P и V_S для использования в формуле (I) можно оценить по другим данным, например, V_P - по годографам рефрагированной волны P , а V_S - по дисперсии длиннопериодных поверхностных волн. Оценка глубины границы обмена зависит главным образом от средних значений V_P и V_S в вышележащем слое, а они для слоёв мощностью в несколько сотен километров в настоящее время известны во многих районах с высокой точностью.

Расчётные оценки величины t_{PS} для Восточно-Европейской платформы, где находятся Обнинск и НОРСАР, получены для нескольких известных разрезов V_P и V_S . Скоростные разрезы для волн P взяты из работ: Гивен и Халлбергер (1980), Массе и Александер (1974), Винник и Рябой (1981). Скоростные разрезы для волн S взяты из работ: Кара и др. (1980), Брэн и Дорман (1963), Кара (1979). Два последних разреза получены для однотипного с

Восточно-Европейской платформой района в Северной Америке. Полученные значения t_{PS} для глубины обмена 400 км лежат в пределах от 42,1 с до 43,7 с. Изменение глубины обмена на 10 км эквивалентно изменению t_{PS} на 1 с для любой комбинации разрезов. Интервал в 1,6 с по времени эквивалентен 16 км по глубине. Наблюдённые значения t_{PS} для первой обменной волны по данным Обнинска (43,2 с) и НОРСАРа (43,4 с, с поправкой за местную скоростную аномалию в верхней мантии) находятся в хорошем соответствии с приведёнными расчётными значениями, означая, что глубина обмена близка к 400 км.

При расчёте значений t_{PS} для западного района США использованы разрезы V_p : Аршамбо и др. (1969), Бурдик и Хелмбергер (1978), Массе и др. (1972) и разрезы V_s : Бисвас и Кнопов (1974, 15 разрезов) и Кара (1979). Специальной поправкой учтена зависимость скорости от частоты, связанная с поглощением. Окончательные расчётные оценки t_{PS} для глубины 400 км лежат в интервале от 45,6 с до 46,9 с, которому соответствует интервал глубин 13 км. Среднее значение t_{PS} для первой обменной волны по данным DUG, G02 и TUC составляет $46,6 \pm 0,5$ с. Эта величина находится в хорошем соответствии с расчётными данными для обмена на глубине 400 км. Несмотря на сравнительно высокую точность наших оценок мы не в состоянии обнаружить значимое (порядка 10 км) расхождение в средней глубине верхней границы переходной зоны между западом США и Восточно-Европейской платформой.

Разница во временах пробега двух основных мантийных обменных волн равна для НОРСАРа (частота 0,1 Гц), Обнинска, G02 и TUC, соответственно, 23,0 с, 23,5 с, 23,5 с и 22,6 с. Среднее значение равно $23,2 \pm 0,2$ с. При использовании значений V_p ,

полученных для Восточно-Европейской платформы, и среднемирового значения v_p/v_s по данным модели PREM (Дэивонский и Андерсон, 1981) соответствующая разница в глубинах обмена равна 241 км. При этом эффективная глубина второй границы оказывается близкой к 640 км, т.е. на ~ 30 км меньше, чем в модели PREM. Анализ возможных погрешностей оценки мощности слоя между двумя границами показывает, что они не превышают нескольких километров.

1936

Для объяснения частотной зависимости амплитуды и времени пробега второй обменной волны по данным НОРСАРА методом Томсона-Хаскелла построены теоретические сейсмограммы для ряда моделей перехода; эти сейсмограммы обработаны так же, как и реальные данные. Наблюдаемую частотную зависимость можно воспроизвести с помощью модели, в которой слой с повышенным градиентом v_s мощностью около 50 км подстилается резкой границей или относительно тонким слоем с высоким градиентом v_s . Наблюдаемый эффект объясняется тем, что длиннопериодная обменная волна формируется в градиентном слое и на резкой границе, а короткопериодная волна — только на границе. Для объяснения слабости или полного отсутствия волны с глубиной обмена около 640 км на записях станций A2Q и DUG следует предположить, что соответствующий переход имеет вид градиентного слоя мощностью не менее 70–80 км. Детали перехода на глубине 510–515 км, ответственного за обменную волну, наблюдаемую на станции A2Q, пока с уверенностью установить нельзя, но, судя по амплитуде этой волны, скачок v_s в пределах перехода составляет около 10%.

С точки зрения геофизической значимости полученных результатов аномалия в районе A2Q заслуживает особого внима-

ния, т.к. она может быть связана с крупным современным рифтом Рио-Гранде. Большой интерес представляют также данные о структуре перехода от верхней мантии к нижней на глубине около 640 км, которые позволяют предполагать, что этот переход - фазовый с отрицательным наклоном кривой фазового равновесия (Винник, 1984).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обоснован и апробирован на большом наблюдательном материале предложенный ранее метод выделения длиннопериодных обменных волн PS .

2. Установлена высокая геофизическая информативность наблюдений обменных волн при исследовании структуры переходной зоны. Показана осуществимость: 1) измерений глубины границ с погрешностью порядка нескольких километров; 2) оценки тонкой скоростной структуры соответствующих переходов при наблюдениях в достаточно широком частотном диапазоне; 3) выделения латеральных неоднородностей структуры переходной зоны с горизонтальным масштабом порядка нескольких сотен километров.

3. Существенно уточнена нормальная глубина перехода, отделяющего верхнюю мантию от нижней, и построено соответствующее распределение скорости поперечных волн с глубиной. Обнаружены большие латеральные вариации структуры переходной зоны, возможные связанные с тектоническими явлениями на поверхности Земли.

Основные результаты диссертации изложены в работах:

1. Анализ наблюдений мантийных волн PS . - Докл. АН СССР, 1979, т.248, № 3, с.573-576 (соавт. Л.П.Винник и Н.Г.Михайлова).

2. Prospects for investigation of the transition zone. - International Workshop, Modern methods of registration and interpretation of seismic observations. Abstracts of paper, Yalta, October 24-30, 1979, p.28 (соавт. Л.П.Винник, Н.Г.Михайлова, Л.И.Ратникова)

3. Fine structure of transition from the upper to lower mantle. - 21st General Assembly IASPEI, 1981, London, Canada, Abstracts, p.B2.7 (соавт. Л.П.Винник и Л.И.Ратникова).

4. Тонкая структура перехода от верхней мантии к нижней. - Докл. АН СССР, 1982, т.262, № 2, с.314-318 (соавт. Л.П.Винник и Л.И.Ратникова).

5. Планетарные и региональные особенности строения мантии по наблюдениям обменных волн PS. - Докл. АН СССР, 1982, т.266, № 2, с.313-316 (соавт. Л.П.Винник и Н.Г.Михайлова).

6. Heterogeneities in the Mantle Transition Zone According to the Observations of P-to-SV Converted Waves. - European Geophysical Society and European Seismological Commission. Programme and abstracts. The University of Leeds, August 23rd-27th, 1982, p.49 (соавт. Л.П.Винник и Н.Г.Михайлова).

7. Properties of the Phase Transition Zone from the Observations of P to S Converted Waves. - XVIII General Assembly of International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG), International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior (IASPEI). Programme and Abstracts. Hamburg, Federal Repub-

lic of Germany, 15-27 August, 1983, p. 248.

(соавт. Л.П.Винник, Н.Г.Михайлова, Г.Л.Косарев, Л.И.Макеева).

8. *Heterogeneities in the mantle transition zone from observations of P-to SV converted waves.* - *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1983 v.33, № 3, p. 149-163 (соавт. Л.П.Винник и Н.Г.Михайлова).

9. Кинематика многократных обменных волн. - Тезисы докладов научно-технической конференции молодых геофизиков Закавказья, Ленинакан, 1983, с.21-22.

10. К вопросу о выделении обменных волн. В сб.: "Алгоритмы, методика и результаты интерпретации геофизических данных", Материалы УП научно-технической конференции геофизиков Украины, К.: Наукова думка, 1985, с.7-10.

Р. Аветисян

1936