

Академия наук Украины
Институт геофизики им. С.И.Субботина

На правах рукописи
УДК 551.15:550.34

САННИКОВА Наталья Петровна

СЕЙСМОТОГРАФИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАНТИИ КАВКАЗСКОГО РЕГИОНА

Специальность 04.00.22 "Геофизика"

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени кандидата
геолого - минералогических наук

Киев - 1993

Робота виконана в Інституті геофізики ім. С.І.Субботина
Академії наук України

Научний керівник: доктор фізико-математических наук
В.С.ГЕЙКО

Офіційні опоненти: доктор геолого-мінералогічних наук
В.В.ГОРДИЄНКО
кандидат фізико-математических наук
А.В.ЕГОРКИН

Ведущая організація: Київський державний університет
ім. Т.Г.Шевченка

Захист дисертації состоится "10" июля 1993 г.
в 11 часов на заседании Специализированного Совета Д 016.02.01
при Институте геофизики им. С.И.Субботина АН Украины по адресу:
252680, Киев - 142, проспект Палладина, 32.

Ваш отзыв на автореферат в двух заверенных экземплярах просим
направить по адресу: 252680, г.Киев, проспект Палладина, 32,
ученому секретарю.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института геофизики
им. С.И.Субботина АН Украины.

Автореферат разослан "___" _____ 1993 года.

Ученый секретарь Специализированного Совета
доктор физико-математических наук

В.С.ГЕЙКО

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00814181 (N)

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность тем. Изучение мантии Земли методами сейсмической томографии является актуальной проблемой как в сейсмологическом, так и в прикладном отношении. С тех пор, как были построены первые трехмерные модели мантии Земли, стала видна взаимосвязь между приповерхностными и глубинными проявлениями геолого-тектонической деятельности. Оказалось, что скоростные свойства среды на больших глубинах связаны с реальными геолого-геофизическими объектами. В решении проблемы изучения этой взаимосвязи важная роль отводится региональной сейсмической томографии, которая может служить средством непротиворечивой увязки различных геолого-тектонических данных и основой для моделирования других геофизических полей. Хотя в настоящее время существует много методов построения сейсмотомографических моделей, их использование на практике часто наталкивается на трудности, обусловленные рядом причин. В первую очередь это необходимость использования очень больших объемов исходных сейсмологических данных. Помимо общей проблемы присутствия неточностей в отчетах отдельных фаз сейсмических волн, разрешенность данных может быть недостаточной для всестороннего освещения конкретных геолого-тектонических структур. В связи с освоением новых методических разработок, базирующихся на теории многомерной линейаризованной обратной кинематической задачи сейсмологии и численных алгоритмах ее решения, возможности сейсмической томографии существенно увеличились. Этому способствует также то, что в настоящее время архивы Международного сейсмологического центра представляют обширный источник сведений о временах пробега волн землетрясений и ядерных взрывов. Становится вполне разрешимой задача построения трехмерных томографических моделей сейсмически активных регионов, в которых взаимное расположение источников и регистрирующих станций позволяет увеличить детальность исследований. Развитию этого направления посвящена настоящая работа.

Цель и задачи исследований. Целью работы являлось построение трехмерной сейсмотомографической модели мантии Кавказского сектора Средиземноморского пояса складчатости и прилегающих территорий по данным о временах пробега Р-волн землетрясений и

ядерных взрывов, опубликованных в бюллетенях Международного сейсмологического центра.

Конкретные задачи выполненных исследований предусматривали:

1. Составление выборок сейсмологических данных, относящихся к территории исследований, которые содержат сведения о временах вступления Р-волн на станцию, зарегистрировавшую событие; эпицентральной дистанции, индексе отождествления вступления и азимуте подхода волны; глубине очага, магнитуде и времени возникновения события; количестве станций мировой сейсмологической сети, зарегистрировавших событие.

2. Анализ распределения невязок времен пробега (Δt_{ij}) Р-волн относительно голографа Джеффриса-Буллена в пределах различных геолого-тектонических структур Кавказского сектора Средиземноморского складчатого пояса, задание информации в ЭВМ и получение специального трехмерного поля времен.

3. Построение трехмерной томографической модели мантии исследуемого региона с опробованием методики, базирующейся на теории многомерной линеаризованной кинематической задачи сейсмологии, предложенной В.С.Гейко и практическое решение этой задачи с использованием численных алгоритмов и программ Т.А.Цветковой.

4. Интерпретацию полученных данных о распределении скорости продольных волн V_p в мантии исследуемого региона и сравнение результатов с другими геолого-геофизическими данными.

Научная новизна. Впервые на основе обобщенной сейсмологической информации построена трехмерная томографическая модель мантии обширного региона, включающего геолого-тектонические структуры Кавказского, Иранского и, частично, Центрально-Анатolianского сегментов Средиземноморского пояса складчатости. Расчеты скоростных характеристик модели оптимальны по отношению к разрешенности исходных данных. Основные черты трехмерного распределения скорости продольных волн для всей территории исследований изучены до глубины 1400 км. До глубины 800 км модель представлена в виде набора двумерных вертикальных и горизонтальных проекций. Построены объемные реконструкции для шести изоповерхностей V_p .

Установлены общие закономерности и отличия в скоростном строении основных тектонических структур исследуемой территории на различных уровнях глубин верхней мантии.

Получены первые сведения о латеральных вариациях глубины залегания и мощности переходной зоны между верхней и нижней мантией. Показано, что для некоторых поверхностных геолого-тектонических структур исследуемого региона существует пространственная согласованность со скоростным строением мантии на глубинах 400 - 450 км.

Практическое значение и реализация результатов исследований.

Результаты данной работы составляют часть большой программы изучения трехмерного распределения скорости Р-волн в мантии Евразии.

Томографическая модель мантии Кавказского сектора Средиземноморского пояса складчатости демонстрирует возможность решения задач, связанных с большими объемами работ по описанию, анализу, интерпретации и заданию в ЭВМ сейсмологической информации. Модель можно рассматривать как основу, на которой могут базироваться сейсмотомографические модели более высокого уровня детальности, а также трехмерные плотностные модели отдельных геолого-тектонических структур исследуемой территории и региона в целом. Методические приемы, использовавшиеся при построении сейсмологических разрезов и объемных реконструкций V_p могут быть применимы при построении томографических моделей мантии Земли других регионов.

Диссертационная работа выполнена в отделе сейсмометрии Института геофизики АН Украины в рамках тем НИР "Многомерные обратные кинематические задачи и сейсмические модели литосферы" (1985-1989 гг., номер государственной регистрации 01850029794), "Восстановление методами сейсмической томографии трехмерного распределения скоростей Р-волн в мантии Евразии" (1992 г., номер государственной регистрации ИАО1004869Р). Результаты работы использованы в рамках проекта 6/82 фонда фундаментальных исследований ГК НТП при Кабинете министров Украины (1992 г.).

Личный вклад автора. Все работы по описанию, анализу и заданию сейсмологической информации в ЭВМ выполнены автором самостоятельно. Часть выборок из бюллетеней МСЦ составлено совместно с Л.П.Ливановой. При построении сейсмотомографической модели использованы теоретические разработки В.С.Гейко, а также численные алгоритмы и программы Т.А.Цветковой. Все расчеты на ЭВМ, описание и интерпретация полученных результатов, их сравнение с другими геолого-геофизическими данными выполнены автором.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались

на IV Всесоюзном симпозиуме по вычислительной томографии (Ташкент, 1989), Международном совещании по геотомографии (Апатиты, 1992), совещании "Исследование тектонофизических свойств литосферы (Киев, 1992).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 работ, 1 статья находится в печати.

Объем работ. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Содержит 182 страницы, включая 70 рисунков, 1 таблицу и список литературы из 102 наименований.

Работа выполнена под руководством доктора физико-математических наук В.С.Гейко, которому автор выражает глубокую благодарность за постановку задачи и постоянное внимание к работе. Автор также глубоко благодарен Т.А.Цветковой за помощь при освоении программного обеспечения; Л.П.Ливановой за оказанное содействие при накоплении экспериментального материала; Т.К.Бурахович, С.Н.Кулику и С.А.Тарашану за дружеское участие и внимание.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассматриваются актуальность, цели, задачи, научная новизна и основные положения результатов выполненных исследований.

В первой главе обсуждается постановка задачи и приведен обзор по исследованиям мантии Земли методами сейсмической томографии. Обсуждаются известные методы построения томографических изображений, использующие сведения о временах пробега или относительных задержках времен пробега объемных волн землетрясений. Охарактеризован круг проблем, возникающих при этом. Томографическая задача в сейсмологии базируется на обращении нелинейного уравнения

$$t(s, R) = \int_{L(s, R)} \mathcal{N}(x, y, z) ds, \text{ где}$$

$\mathcal{N}(x, y, z)$ – медленность в среде, $L(s, R)$ – луч, связывающий источник и приемник, $t(s, R)$ – время пробега. Общего решения таких нелинейных задач не существует, поэтому широко используется принцип линеаризации [В.Г.Романов, 1972; П.Фирбас, 1990]. В главе охарактеризованы методы и подходы к практическому решению задачи. Рассматриваются работы [Aki K., Cristofófersen A., 1976, 1977; Dziewonski A.M., Hager В.H., Ф. Anderson, 1977, 1983, 1984; Thompson C.J., Gubbins D., 1982; Backus G., Gilbert F,

1967; Ю.А.Бурмаков, Л.П.Винник, А.В.Треусов, 1988]. Представлен обзор известных сейсмотомографических моделей мантии Земли, как планетарных, так и региональных. Первые трехмерные томографические модели, освещающие как верхнюю, так и нижнюю мантию Земли, построены А.Дзевонским, Дж.Вудхаузенем, Л.Андерсоном [1977, 1983, 1984]. Они послужили толчком для построения более детальных сейсмотомографических моделей, связанных с конкретными геолого-тектоническими регионами. Построены модели для регионов Тонга [Zhou Hua-Wei, 1990], Курильской и Марианской дуг [Van der Hilst Rob D., Stein Seth, Spakman Wim, Wortel Rinus, 1989], юго-запада Японии [Hirahara K., 1981], Евро-Средиземноморского региона [Granet M., Champret J., 1989], Балкан, Тянь-Шаня, Памира и Прибайкалья [Ю.А.Бурмаков, Л.П.Винник, А.В.Треусов, 1988], Юго-Восточной Европы, Малой Азии, Восточного Средиземноморья, Центральной Азии [В.С.Гобаренко, Т.Б.Яновская, С.Б.Николова, 1985, 1986]. По двум миллионам данных о временах вступления Р-волн построена трехмерная сейсмотомографическая Р-скоростная модель мантии для всего земного шара [Inoue Hiroshi, Fukao Yoshio, Tanabe Kunio, Ogata Yoshiko, 1990]. В этой же главе обсуждаются вопросы структуры переходной зоны между верхней и нижней мантией и присутствия границ раздела в мантии Земли. Из проведенной систематизации данных о глубине границ в мантии видно, что имеются отождествленные сейсмические границы, связанные с глубинами 200, 210, 330, 400, 460, 520, 660, 670, 770, 910, 980, 1065 и 1080 км [Datt R., 1981; Van der Hilst Rob D., Spakman Wim, 1989; Muirhead K. J., Hales A. L., 1980]. Вопрос о достоверности выделения границ в различных горизонтах мантии Земли является дискуссионным.

По характеру использования исходной информации при обращении аномалий времен пробега Р-волн можно выделить два подхода. В первом случае предполагается, что аномалии времен пробега накоплены в слое, расположенном непосредственно под группой регистрирующих станций, а остальная часть пути, пройденного волной, находится в латерально-однородной среде. Такой подход использовался в работах [Аки К. и др., 1976, 1977; Л.П.Винник, 1976; Ю.А.Бурмаков, Л.П.Винник, А.В.Треусов, 1988]. Второй подход предполагает, что исследуемый объем совпадает с областью, содержащей лучи зарегистрированных волн, он использован во многих вышеперечисленных работах.

Подход, использованный в диссертационной работе, основывается на предположении, что аномалии времен пробега Р-волн накоплены в области вершины луча. Исходя из этого, при построении специального трехмерного поля времен наблюдения времена прихода волн были отнесены к области максимального погружения луча, а их аномалии связывались со скоростными мантийными неоднородностями.

Отмечается, что первые результаты по изучению скоростного строения верхней мантии части территории исследований, охваченной в настоящей работе, были получены Л.П.Винником, А.А.Годзи-ковской, Е.И.Патарая, Д.И.Сихарулидзе, А.Х.Баграмян, [1976, 1978]. Г.Я.Мурусидзе в 1987 году предложена одномерная скоростная модель мантии Кавказа до глубины 900 км. Настоящая работа посвящена построению трехмерной сейсмотомографической модели мантии Кавказского сектора Средиземноморского пояса складчатости и прилегающих территорий до глубин, включающих переходную зону между верхней и нижней мантией.

Во второй главе рассматриваются методические вопросы, связанные с построением трехмерной сейсмотомографической модели мантии исследуемого региона и приводится характеристика исходных сейсмологических данных.

Вычисление эффекта скоростных неоднородностей объемной модели крупных сегментов мантии Земли является трудоемкой процедурой и требует больших объемов исходной сейсмологической информации. Поэтому на начальных этапах были проанализированы данные о временах вступления Р-волн, опубликованных Международным сейсмологическим центром (МСЦ) с 1966 по 1987 год и составлены выборки данных для территории, заключенной между 40° - 55° восточной долготы и 30° - 45° северной широты. Из бюллетеней МСЦ было отобрано 326 событий (землетрясений и ядерных взрывов), происшедших на поверхности земного шара за период с июня 1966 г. по май 1987 года. В рассмотрение были включены только коровые землетрясения, из них отобраны такие, что:

- 1) магнитуда M землетрясения более 5.0;
- 2) количество станций N , зарегистрировавших событие, более 300;
- 3) дисперсия времен пробега σ , приведенная в бюллетенях МСЦ для каждого события, менее 2 с.

Такой выбор был определен тем, чтобы отобрать, по-возможности наиболее равномерную и стандартную информацию. В работе приведен каталог этих 326 событий, который содержит сведения о геог-

рафических координатах, дате и времени возникновения события, глубине очага, магнитуде и количестве станций мировой сейсмологической сети, зарегистрировавших конкретное событие.

Помимо каталога землетрясений и ядерных взрывов были составлены станционные каталоги, содержащие исходные и расчетные данные. Для каждой станции мировой сейсмологической сети, зарегистрировавшей лучи Р-волн, пересекавшие территорию исследований, в станционный каталог, кроме данных, характеризующих источник, были занесены сведения о расстоянии до источника Δ^0 , азимуте A^0 на станцию наблюдения, невязке во времени относительно годографа Джеффриса-Буллена Δt_{ij} и индексе, характеризующем уверенное или неуверенное отождествление волны, взятое из бюллетеней МСЦ. По известным координатам сейсмологических станций и координатам эпицентра вычислялись координаты вершины луча. Общее количество станционных каталогов составило около 1500.

Данные этих каталогов послужили основой для построения специального трехмерного поля времен по типу двумерных полей Н.Н. Пузырева [1975, 1979]. Осреднение исходной сейсмологической информации в плане производилось по трапециям размером $1^0 \times 1^0$. Для каждой трапеции была составлена выборка данных в виде таблицы (Δ^0 , A^0 , Δt_{ij} , индекс отождествления вступления волны); в дальнейшем данные были упорядочены по возрастанию эпицентрального расстояния. Локальные сечения поля времен рассчитаны в виде годографов: $t(\Delta) = t_0(\Delta) + \Delta t_{ij}$, где $t_0(\Delta)$ - годограф Джеффриса-Буллена для поверхностного источника, заданный с точностью через 0,1 с через $0^0, 01$, поскольку с такой же точностью определяются, соответственно, Δt_{ij} и Δ , приведенные в бюллетенях МСЦ. В зависимости от индекса отождествления вступления различным наблюдениям придавался различный весовой коэффициент. При графическом выводе наблюденных зависимостей $T(\Delta)$ точки с различным весом изображались разными маркерами.

По характеру экспериментальных зависимостей $T(\Delta)$ оценивалась принципиальная скоростная модель: наличие или отсутствие волноводов, зон повышенного или низкого градиента скорости Р-волн. На основе анализа всей совокупности данных установлено, что принципиальных оснований для построения волноводной скоростной модели мантии Кавказского сектора Средиземноморского пояса складчатости не было. Отчетливые разрывы годографов и смещение их последующих ветвей относительно предыдущих на существенно большие вре-

мена для территории исследований не установлены. Оказалось возможным аппроксимировать наблюдаемые зависимости $T(\Delta)$ в локальных сечениях поля времен гладкой полиномиальной функцией. При этом, если по мере увеличения эпицентрального расстояния наблюдались запаздывания времен пробега, в скоростной модели восставливались области низкого вертикального градиента скорости P -волн.

В зависимости от разреженности используемого набора данных и анализа распределения Δt_{ij} относительно голографа Джеффриса-Буллена были выделены области, совокупные данные по которым использованы для обращения в скоростную модель. Для центральной части территории исследований, включающей Большой Кавказ, Закавказский срединный массив, Южнокаспийскую рифтовую впадину, латеральная разреженность исходных данных составила 200-300 км. С меньшей разреженностью освещены Предкавказская и Туранская плиты и южная часть территорий, заключенная между 30° - 35° северной широты.

После построения специального трехмерного поля времен и его локальных сечений решались две задачи: задача нахождения множества значений лучевых параметров, соответствующих заданным наборам данных о временах вступления P -волн и задача определения коэффициентов представления функции распределения скорости. Метод обращения исходных данных в трехмерную скоростную модель базируется на теории решения многомерной обратной кинематической задачи сейсмологии [В.С.Гейко, 1983-1989]. В настоящей работе метод применен к анализу более чем 10000 лучевых траекторий P -волн, которые пересекли территорию исследований в интервале эпицентральных расстояний от 2° до 100° . При построении трехмерной сейсмотомографической модели мантии использованы численные алгоритмы и программы Т.А.Цветковой [1984-1989].

В третьей главе помещен краткий геотектонический очерк территории исследований, в котором рассмотрены также некоторые модели геолого-тектонического развития региона.

Территория исследований охватывает геолого-тектонические структуры Кавказского, Иранского и, частично; Центрально-Анатолийского сегментов Средиземноморского пояса складчатости. Из основных структур Средиземноморского пояса на территории исследований можно выделить Большой Кавказ, который входит как слагаемое в Крымско-Кавказско-Копетдагскую складчатую геосинклинальную

систему, Закавказский срединный массив, Южнокаспийскую рифтовую впадину, крайнюю юго-восточную часть Черноморской впадины. К Малокавказско-Иранской складчатой геосинклинальной области относятся Малокавказская складчатая геосинклинальная системы, Центрально-Иранский массив и Эльбурс, а также складчатая система Загроса. Восточно-Средиземноморская складчатая геосинклинальная область представлена Северо-Анатолийской территорией и частью Таврской системы. Территория исследований фрагментарно включает в себя также Туранскую и Аравийскую платформы.

На основании работ [В.Е.Хаин, 1984; В.Н.Шолпо, 1987; И.П.Гамкрелидзе, 1989; Е.Е.Милановский, 1963; Е.П.Рогожин, 1989; Ш.А.Адамия, 1974; С.О.Ачикгезян, 1989] охарактеризованы основные тектонические структуры исследуемой территории, такие как: Большой Кавказ и Закавказский срединный массив, Южнокаспийская рифтовая впадина, юго-восточная часть Черноморской впадины, Малокавказская складчатая геосинклинальная система, Иранский срединный массив и Эльбурс; складчатая система Загроса, Центральная Анатолия и Тавриды. Более детально геологическое строение не рассматривается, поскольку характерные размеры скоростных неоднородностей мантии, полученные в работе, не могут коррелироваться с геологическими структурами более высокого порядка.

Предметом многолетней дискуссии служит происхождение отдельных геолого-тектонических структур Альпийского пояса: является ли их форма первичной, или она возникла вследствие горизонтальной деформации тектонических зон, которые до этой деформации имели иное простирание. В работе коротко охарактеризованы некоторые геодинамические модели развития региона. Многие современные геодинамические модели развития Кавказского сектора Средиземноморского пояса складчатости предполагают тектоническое сближение Аравийской плиты с Евразией, а геологическая история региона рассматривается, в основном, с позиций плитовой тектоники [В.Е.Хаин, 1984; М.Л.Баженов, В.С.Буртман, 1990; И.П.Гамкрелидзе, 1989; В.Г.Кузьмин, И.М.Сборщиков, 1989; Л.П.Зоненшайн и др., 1979; Philip H., Cisternas A., Gvi'shiani A., Gorzheov A., 1989]. Для территории Большого Кавказа в работе приведены альтернативные модели: [В.Е.Хаин, 1984] и [В.Н.Шолпо, 1987].

В четвертой главе приведены данные об отклонениях времен пробега Р-волн относительно годографа Джеффриса-Буллена и анализ распределения невязок Δt_i для различных регионов территории

исследований. В результате выделены области, для которых рассчитаны региональные модели $V_p(z)$ верхней и нижней мантии до глубин 1400-2700 км.

Анализ распределения Δt_{ij} , проведенный для всей исследуемой территории показал, что на протяженных интервалах эпицентральных расстояний наблюдаются существенные отличия реальных времен распространения Р-волн от модели Джеффриса-Буллена. Для территории Туранской платформы до эпицентрального расстояния $\Delta = 16^\circ$ регистрируются отрицательные временные невязки, достигающие по величине пяти секунд. Положительными невязками порядка двух-трех секунд до $\Delta = 11^\circ$ отмечается территория горного сооружения Большого Кавказа. Такие же положительные невязки регистрируются до эпицентрального расстояния $6,5^\circ$ под Северо-Закавказской зоной межгорных впадин. На территории Аравии в интервале эпицентральных расстояний $2^\circ - 5^\circ$ преобладают отрицательные невязки времен пробега Р-волн величиной около $-1,0$ с, которые становятся значительно больше в интервале эпицентральных расстояний от 7° до $12,5^\circ$ и достигают по величине трех секунд. Отрицательные невязки порядка $-2,5$ с регистрируются также до эпицентральных расстояний $9^\circ - 14^\circ$ для складчатых сооружений обрамления Аравии.

Сравнение теоретических кривых $T(\Delta)$, аппроксимирующих реальные наборы данных о временах пробега Р-волн для различных территорий района исследований позволило выделить несколько типов изменения кривых $T(\Delta)$ вблизи эпицентрального расстояния в 20° . Если на эпицентральном расстоянии вблизи 20° производная $\frac{dT}{d\Delta}$ временной функции изменяется скачкообразно, то на аппроксимирующей кривой восстанавливается резкая петля. Резкие петли восстанавливаются на кривых $T(\Delta)$, рассчитанных для территории Туранской платформы, всей территории Каспийского моря, включая северное мелководье и Южнокаспийскую впадину, Предкавказской плиты и горного сооружения Большого Кавказа. Отчетливо выражены, но не такие резкие петли, восстанавливаются на кривых $T(\Delta)$ характеризующих территории восточной окраины Черноморской впадины; Северо-Закавказской зоны межгорных впадин; западной, северной и восточной (исключая южную) частей Малокавказской области. Менее выраженные петли восстанавливаются для южной части Малокавказской области и Таврско-Загросской территории. Для большей части Центрально-Иранского массива и Северо-Анатолийской территории петли при теоретических расчетах не восстанавливаются.

Установлено, что все резкие перегибы на кривых $T(\Delta)$ концентрируются на эпицентральных расстояниях $21^{\circ} - 22^{\circ}$, менее резкие занимают интервал $22^{\circ} - 23^{\circ}$. Петли небольшой амплитуды сконцентрированы на эпицентральных расстояниях $19^{\circ} - 19,5^{\circ}$. Для территории северного выступа Аравийской плиты при теоретических расчетах восстанавливаются две петли на эпицентральных расстояниях $\Delta = 19^{\circ}$ и $\Delta = 24^{\circ}$.

Региональные модели $V_p(\xi)$ рассчитаны для территории Большого Кавказа, восточной окраины Черноморской впадины, Закавказских межгорных впадин, части Предкавказской плиты, расположенной к северу от Центрального сегмента Большого Кавказа, западной части Туранской плиты, Малого Кавказа, Центрально-Иранского массива, южной, восточной и западной частей Кюнокаспийской рифтовой впадины, Восточного Тавра, части Анатолийской территории и северного выступа Аравии. Минимальная расчетная глубина - 1400 км была получена для восточной окраины Черноморской впадины, максимальная - 2700 км для Центрально-Иранского массива.

На основе полученных региональных моделей $V_p(\xi)$ установлено, что большинство скоростных неоднородностей в вертикальном разрезе мантии исследуемой территории концентрируется в верхнем 700 - километровом слое. Максимальные различия в скоростных характеристиках нижней мантии не превышают 1,5-2% и связываются, в основном, с юго-западной частью территории исследований. Скоростные неоднородности в вертикальных разрезах верхней мантии наблюдаются на всех уровнях глубин. Непосредственно под корой различия в скоростных характеристиках составляют 6-7%. Под территориями Центрального и Восточного сегментов Большого Кавказа в интервале глубин 80 - 140 км наблюдается аномальная область, которая проявляется быстрым увеличением скорости с 7,72 км/с на глубине 80 км до 8,20 км/с на глубине 140 км. Перепад скорости при этом составляет около 6%. Интервал глубин от 200-240 км до 400 км для этой территории отмечается медленным возрастанием V_p по мере увеличения ξ .

При сравнении характера зависимости V_p от ξ в различных одномерных моделях на глубинах порядка 400-650 км выделено несколько типов поведения кривых $V_p(\xi)$ в этом интервале. Общие черты в вертикальных скоростных разрезах на уровне переходной зоны между верхней и нижней мантией установлены для территорий:

- Большого Кавказа, Предкавказья и Туранской плиты;

- крайней юго-восточной части Черноморской впадины и Закавказской зоны межгорных впадин;
- Южнокаспийской впадины, Западнотуркменского, Предэльбурского и Нижнекуринского прогибов;
- Малокавказской области и западной части Иранского срединного массива;
- центральной и западной части Иранского срединного массива и горных сооружений обрамления Аравии.

В пятой главе охарактеризована трехмерная сейсмотомографическая модель мантии Кавказского региона и прилегающих территорий и проведено сравнение полученных скоростных характеристик модели с некоторыми известными до настоящего времени сейсмологическими результатами и другими геолого-геофизическими данными.

Основные черты трехмерного распределения скорости Р-волн для территории, заключенной между 40° - 54° восточной долготы и 33° - 44° северной широты изучены до глубины 1400 км. До глубины 800 км томографическая модель мантии составлена из набора двумерных и объемных проекций. Вертикальные сечения модели представлены сейсмологическими разрезами мантии вдоль шести широтных и семи меридиональных профилей с шагом в 2° по широте и долготе, а горизонтальные сечения получены в виде карт распределения сейсмических скоростей для различных уровней мантии, а также структурных планов и объемных реконструкций поверхностей V_p равных 8,0 км/с; 8,5 км/с; 9,0 км/с; 9,5 км/с; 10,0 км/с и 10,5 км/с.

Карты распределения скоростей Р-волн приведены для уровней глубин от 50 км до 650 км с шагом по глубине через 50 км и для уровня перехода кора-мантия. При расчетах в модели учтена условная "джеффрисовская" кора. В самом верхнем, подкоровом слое мантии наблюдается преимущественная согласованность скоростной и тектонической зональности. Направление хода изолиний V_p в восточной части территории совпадает с направлением вытянутости Каспийской впадины, высокоскоростные области очерчивают контуры Туранской и Аравийской платформ. Для территории заключенной между Южнокаспийской впадиной и Северо-Аравийским выступом направление хода изолиний V_p совпадает с направлением протяженности основных альпийских структур. Особое место занимает низкоскоростная область, приуроченная к территориям Большого и Малого Кавказа. Эта область ориентирована, в основном, вкрест тектонической зональности. На срезе $H = 50$ км контур аномальной области очерчивает изолиния

$$V_p = 7,70 \text{ км/с.}$$

С глубины 150 км наблюдается инверсия скоростных свойств среды, которая выражена в двух аспектах; изменении скоростной зональности в плане всей исследуемой территории и инверсии скоростных свойств верхней мантии по мере увеличения глубины. Срезы модели, отражающие неоднородности мантии на глубинах 150 км, 200 км, 250 км и 300 км, характеризуются широтной вытянутостью изолиний V_p . Отчетливо выражено возрастание значений V_p по мере смещения от юга к северу территории исследований. В северной части исследуемой области низкоскоростная аномалия исчезает и скорость здесь становится выше, чем на остальной части территории. Высокоскоростная область на глубинах 200–300 км охватывает территории Центрального и Восточного сегментов Большого Кавказа, Известкового Дагестана и Терско-Каспийского краевого прогиба.

Еще одно изменение скоростных свойств среды намечается с глубины 400 км. На срезе модели, характеризующем неоднородности мантии на глубине 400 км скоростная зональность вновь коррелируется с тектонической зональностью. Изолиния $V_p = 8,90 \text{ км/с}$ проходит вдоль северных границ Западно-Кубанского и Терско-Каспийского краевых прогибов, отделяющих горное сооружение Большого Кавказа от Предкавказской плиты. Изолиния $V_p = 9,0 \text{ км/с}$ совпадает с протяженностью главной оси Большого Кавказа, а в районе Апшеронского полуострова, изменяя свое направление, ориентируется вдоль Западно-Каспийского разлома. Под Малокавказской геосинклинальной областью располагается высокоскоростная зона, которая еще более отчетливо выражена на срезе модели $H = 450 \text{ км}$. Низкой скоростью характеризуется на этом срезе восточная часть Южно-каспийской впадины. Так же отчетливо эта низкоскоростная зона выражена на срезе модели $H = 500 \text{ км}$. Под территорией Терско-Каспийского краевого прогиба также отмечается понижение скорости, хотя и менее значительное, чем в районе Южнокаспийской впадины. Распределение скорости Р-волн в плане на уровнях глубин 600 – 650 км выглядит изометричным, а различие в значениях V_p не превышает 0,2 км/с.

При обсуждении сейсмологических разрезов особое место уделено характеристике латеральных вариаций глубины залегания и мощности переходной зоны между верхней и нижней мантией. В рамках модели эта переходная зона интерпретировалась как область резкого возрастания градиента скорости Р-волн в интервале глубин,

преимущественно от 400 км до 650 км. На разрезах меридионального направления видно, что в северной части территории исследований, включающей геолого-тектонические структуры Большого Кавказа, Предкавказья и часть Туранской плиты, переходная зона между верхней и нижней мантией имеет выдержанную мощность в интервале глубин от 450 км до 600 км, как верхняя, так и нижняя ее границы отчетливо прослежены. Вариации в уровне глубины залегания верхней границы проявляются при смещении к югу. В плане всей исследуемой территории разделение между этими двумя областями проходит вдоль границы Евразийской литосферной плиты, выделяемой [Л.П. Зоненшайн и др., 1979]. Во всей южной области верхняя граница имеет сложный рельеф и прослеживается не повсеместно, глубина ее залегания изменяется от 370 км до 470 км, а на территориях, прилегающих к Анатолийскому сдвиговому разлому эта граница отчетливо не устанавливается. Нижняя граница переходной зоны отчетливо прослежена на всей территории исследований и имеет уровень залегания 600–650 км. Под определенными участками территории исследований в годошве верхней мантии или в середине переходной зоны наблюдаются слои с пониженным градиентом скорости Р-волн. Области с низким градиентом скорости Р-волн наблюдаются в интервалах глубин:

360 – 490 км под территорией Южнокаспийской рифтовой впадины;

360 – 410 км под территорией Туранской плиты;

250 – 400 км под территорией Большого Кавказа;

320 – 400 км под территорией Предкавказья;

450 – 530 км под территорией Иранского срединного массива.

Сравнение полученных в работе скоростных характеристик мантии исследуемого региона выполнено для двух групп данных. Региональные модели V_p ($\%$) сопоставлены с известными одномерными скоростными разрезами верхней мантии Большого Кавказа и Туранской плиты и прогнозными скоростными разрезами, опирающимися на состав и РТ-условия в мантии, а данные о трехмерном распределении V_p – с имеющимися сведениями о горизонтальных вариациях скорости Р-волн в верхней мантии Кавказа и распределениях поправок к скорости этих волн в верхней мантии для восточной окраины Черноморской впадины и Малого Кавказа.

Проведенные расчеты зависимости V_p от $\%$ для территории Туранской плиты обнаруживают хорошее согласование с прогнозным скоростным разрезом для этого региона, построенным до глубины 300 км

с учетом аномальных температур пород мантии и изменения состава пород в подкоровой зоне и верхней мантии [В.В.Гордиенко, 1990]. Сопоставление этого прогнозного разреза с рассчитанным в работе показывает, что различия в значениях V_p на разных глубинах не превышают 0,1 км/с. При сравнении региональной модели V_p ($\%$), рассчитанной до глубины 1700 км для территорий Центрального и Восточного сегментов Большого Кавказа, с построенной [Г.Я.Мурусидзе, 1987] скоростной моделью мантии Кавказа отмечены некоторые различия в моделях, которые обнаруживаются вследствие различных подходов к параметризации среды. На наш взгляд, представляется маловероятным скачкообразное увеличение скорости на глубине 610 км почти на 35%, поскольку трудно найти физическое объяснение подобному явлению. Согласно расчетов, приведенных в диссертационной работе, перепад скорости в переходном слое составил около 15%; глубины же, с которыми связываются резкие изменения скорости, в целом, почти совпадают.

Сравнение данных о трехмерном распределении скорости Р-волн в мантии Кавказского региона с результатами работ [Л.П.Винник, А.А.Годзиновская, Е.И.Патарая, Д.И.Сихарулидзе, А.Х.Баграмян, 1978] по изучению горизонтальных вариаций скорости Р-волн в верхнем двухсоткилометровом слое мантии Кавказа обнаруживает хорошее согласование данных в плане до глубины около 100 км. Различия в структуре и скоростной зональности мантии проявляются с глубины 150 км, где, согласно проведенных расчетов, наблюдается изменение скоростных свойств среды как по глубине, так и в плане всей исследуемой территории. По результатам работы [Г.Н.Бугаевский, В.С.Гобаренко, С.А.Капитанова, Н.М.Селина, 1986] в верхней мантии Малой Азии и восточной части Черноморской впадины на глубинах 100 - 200 км установлена область относительно низкой скорости. Данные диссертационной работы подтверждают предположение авторов о продолжении и углублении этой низкоскоростной области в регион Малого Кавказа, восточной Турции и северо-западного Ирана; глубина зоны относительно пониженных скоростей распространяется до 300 км. На глубинах 400-450 км под этой территорией установлена высокоскоростная область.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации:

1. Проведен анализ 10000 наблюдений времен пробега Р-волн землетрясений и искусственных ядерных взрывов. Установлено, что

систематические положительные отклонения реальных времен пробега Р-волн от стандартной модели Джеффриса-Буллена в интервале эпицентральных расстояний от 2° до 7° - 11° связываются с территориями Северо-Закавказской зоны межгорных впадин и горного сооружения Большого Кавказа. Отрицательные невязки времен пробега в различных интервалах эпицентральных расстояний характеризуют территории складчатых сооружений обрамления Аравии, Туранской платформы и Южнокаспийской рифтовой впадины.

2. Построена трехмерная томографическая модель мантии Кавказского сектора Средиземноморского складчатого пояса и прилегающих территорий. До глубины 800 км модель представлена в виде набора двумерных и объемных проекций. Прослежены ограничения по глубине для низкоскоростных и высокоскоростных аномальных зон верхней мантии в подкорковой области и распределение областей низкого градиента скорости Р-волн на различных уровнях глубин. Установлено существование высокоградиентного скоростного слоя под территориями Центрального и Восточного сегментов Большого Кавказа на глубине 100-150 км.

3. Рассчитаны 19 региональных моделей V_p ($\%$), отражающие распределение скоростей Р-волн в мантии до глубин около 2000 км. Максимальная расчетная глубина для отдельных моделей располагается в интервале глубин от 1400 км до 2700 км. Установлено, что изменение скоростных характеристик в нижней мантии исследуемой территории не превышает 1,5 - 2%.

4. Впервые прослежены латеральные вариации глубины залегания и мощности переходной зоны между верхней и нижней мантией. Верхняя граница переходной области расположена в интервале глубин от 370 км до 470 км. На территориях, прилегающих к Анатолийскому сдвиговому разлому эта граница отчетливо не устанавливается. Нижняя граница переходной зоны отчетливо прослежена на всей территории исследований и имеет уровень залегания 600-650 км.

5. Показано, что для некоторых приповерхностных геолого-тектонических структур исследуемого региона существует пространственная согласованность со скоростным строением мантии на определенных этажах глубин. Преимущественная согласованность скоростной и тектонической зональности наблюдается в подкорковом слое мантии. После перерыва, в интервале глубин 400-450 км снова проявляется пространственная связь глубинных и приповерхностных структур; здесь скоростная зональность коррелируется с тектоническими струк-

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

турами Южнокаспийской рифтовой впадины, Малокавказской области и горного сооружения Большого Кавказа, включая цепь Предкавказских краевых прогибов.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Гейко В.С., Цветкова Т.А., Ливанова Л.П., Санникова Н.П. Сейсмологические данные и задача томографии Земли. // Сб.: IV Всесоюзный симпозиум по вычислительной томографии. - Ташкент. - 1989. - тезисы доклада.

2. Гейко В.С., Цветкова Т.А., Ливанова Л.П., Санникова Н.П. Многомерные обратные кинематические задачи и сейсмические модели литосферы. // ИГФ АН УССР. - научный отчет. - 1989. - 180 с.

3. В.С.Гейко, Н.П.Санникова. Трехмерная скоростная модель мантии Кавказского сектора Средиземноморского складчатого пояса и прилегающих территорий по данным Р-волн. // Сб. международного совещания по геотомографии. - Апатиты. - 1992. - тезисы доклада.

4. В.С.Гейко, Т.А.Цветкова, Л.П.Ливанова, Н.П.Санникова, Н.В.Шаров. Трехмерное распределение скоростей Р-волн в мантии Центральной и Северной Европы. // там же. - 1992.

5. Санникова Н.П. Сейсмотомографические модели мантии Большого кавказа и Закавказского микроконтинента. // Киев. - 1992. - Деп. в УкрИНТЭИ. - 22.07.92. - №1120 - Ук 92. - 39 с.

Вейко

Подп. к печ. 19 04 93. Формат 60x84 $\frac{1}{4}$ Бумага Тисс 1/2
Печ. офс. Усл. печ. л. 0 93 Уч.-изд. л. 0,70 Тираж 120.
Зак. 3-3572.

Киевская книжная типография научной книги. Киев, Репина, 4.

115118711

AB 27.394