

МЕЖДУВЕДОМСТВЕННЫЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ КОМИТЕТ  
ПРИ ПРЕЗИДИУМЕ АКАДЕМИИ НАУК СССР

ACADEMY OF SCIENCES OF THE USSR  
SOVIET GEOPHYSICAL COMMITTEE



*РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ПО МЕЖДУНАРОДНЫМ ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ПРОЕКТАМ*

Е. Н. МИЛЮТИНА

**СЕЙСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ВЕРХНЕЙ МАНТИИ**

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

МОСКВА 1976

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ПО МЕЖДУНАРОДНЫМ  
ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ПРОЕКТАМ

---

RESULTS OF RESEARCHES  
ON THE INTERNATIONAL  
GEOPHYSICAL PROJECTS



*RESULTS OF RESEARCHES  
ON THE INTERNATIONAL GEOPHYSICAL PROJECTS*

E. N. MILJUTINA

SEISMIC STUDIES  
OF THE UPPER MANTLE

EVOLUTION OF METHODOLOGY



PUBLISHING HOUSE «NAUKA»

*Moscow 1976*



РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ПО МЕЖДУНАРОДНЫМ ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ПРОЕКТАМ

550.3 + 551.11

Е. Н. МИЛЮТИНА

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ВЕРХНЕЙ МАНТИИ

ЭВОЛЮЦИЯ МЕТОДОЛОГИИ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

Москва 1976



Сейсмические исследования верхней мантии. Милютина Е.Н. Изд-во "Наука", 1976, с. 1-136.

С помощью серии исторических обзоров показаны основные этапы в развитии научного подхода к изучению верхней мантии сейсмическими методами: 1) период однозначной трактовки первых скоростных моделей мантии, созданных во время становления ее сейсмических исследований (1897г. - 20-е годы XX в.); 2) классический период сейсмических исследований мантии, который характеризуется тем, что на смену однозначной трактовке каждого скоростного разреза приходит однозначная трактовка стандартных разрезов, обобщающих данные по Земле в целом (20-50-е годы XX в.); 3) современный период информационного взрыва в сейсмологии и осознания вероятностно-статистического характера представлений о мантии.

Анализ истории изменения научных подходов к изучению мантии позволил наметить наиболее плодотворные тенденции дальнейшего развития ее исследований. В работе имеется почти исчерпывающий библиографический указатель литературы, посвященной изучению мантии с помощью сейсмологии с 1897 по 1973 г.

Работа представляет интерес для геофизиков, занимающихся изучением внутреннего строения Земли.

Табл. 3. Илл. 12. Библ. 1308 назв.

Ответственный редактор  
член-корреспондент АН СССР  
Ю.В.РИЗНИЧЕНКО

## ВВЕДЕНИЕ

По современным представлениям, особенности пространственного размещения основных структур земной коры, причины их формирования, развития и процессы, протекающие в них, не могут быть объяснены свойствами самой коры. Поэтому для решения ряда кардинальных проблем геотектоники (например, происхождение материков и океанов, направление развития и движения коры и др.), для понимания сущности горообразования и установления причин землетрясений, для выявления законов распределения полезных ископаемых и возможностей использования энергетических ресурсов земных недр необходимо изучение мантии, и прежде всего ее верхней 900-километровой толщи, подстилающей земную кору.

Это изучение осуществляется косвенными методами, причем наиболее полные и детальные результаты получены при проведении сейсмических исследований (глубинные сейсмические зондирования (ГСЗ), сейсмология, большие взрывы).

В настоящее время, когда верхняя мантия стала объектом широких исследований по комплексным международным проектам, ощущается потребность в работах, которые анализируют пройденный наукой путь, и в частности выявляют тенденции развития сейсмических исследований мантии.

История этих исследований насчитывает около 70 лет. Отдельным ее периодам посвящена обширная литература как за рубежом (работы Д. Андерсона, Б. Гутенберга, Г. Джеффриса, А. Зибберга, Д. Макелвейна), так и в СССР (труды В.В. Белоусова, Г.Н. Бугаевского, Р.М. Деменишковой, А.А. Лукка, В.А. Магничкого, Ю.П. Непрочнова, Ю.В. Ризниченко, Р.З. Тараканова, Е.Ф. Саваренского и др.). В то же время лишь единичные работы (например, Б. Гутенберга, Г. Джеффриса, В.И. Кейлиса-Борока, А.А. Лукка) затрагивают методологические аспекты сейсмических исследований мантии. Работ же, в которых дан исторический анализ сейсмических исследований мантии с точки зрения оценки эволюции их методологического аппарата совсем нет.

При написании данной монографии автор стремился хотя бы в некоторой степени восполнить этот пробел. Причем он не ставил себе цель изучить историю развития отдельных сейсмических методов, описать их точность, детальность, выяснить ограничения их применения — его интересовало изменение наиболее общего подхода, которым руководствовались сейсмологи при изучении мантии.

Материалом для книги послужили практически почти все работы по сейсмологии верхней мантии, опубликованные с 1897 г. до конца 1973—начала 1974 гг. Они приведены в библиографическом указателе, представляющем, как мы надеемся, самостоятельный интерес. Кроме того, были использованы фондовые материалы Всесоюзного научно-исследовательского института геофизики (ВНИИГеофизика), Института физики Земли (ИФЗ) АН СССР, Межведомственного геофизического комитета (МГК) и Мирового центра данных (МЦД).

Анализ этого материала позволил автору наметить периодизацию в развитии научных подходов к изучению верхней мантии с помощью сейсмологии. Хотя она не обусловлена столь же непосредственно экономическими и социальными запросами общества, как, например, периодизация в развитии

геологии<sup>1</sup>, однако стимулы развития сейсмических исследований и их технический и теоретический уровень тоже совершенно очевидно определяются материальными и социальными факторами, которые мы попытались проанализировать. В результате был сделан вывод, что в течение каждого периода создается материальная база для получения данных определенного объема и точности, разрабатываются методы интерпретации и их применение дает результаты, при последующем осмыслении которых возникает определенный научный подход к изучению верхней мантии. Реализация же нового подхода влечет за собой изменение представлений о ее строении.

В соответствии с этим построена каждая глава.

Хотя тот или иной научный подход возникает не в один день и новые подходы и представления сосуществуют со старыми иногда десятилетиями, периодизация в развитии сейсмических исследований мантии намечается достаточно четкая. Наше мнение по этому поводу очень близко к точке зрения Ю.В. Ризниченко (Гутенберг, 1963), считающего, что развитие геофизики, и в частности сейсмологии, пережило "период интенсивного развития сейсмологии с Голицыным и Вихертом во главе, который закончился накануне Великой Октябрьской революции 1917 г." (стр. 10), классический период "накопления и классификации разрозненных фактов, их общего осмысления и количественной оценки сравнительно простыми методами" (стр. 9) и вступило в "новый, современный период, начало которого связано с международным сотрудничеством, развернувшимся с 1957 г. (стр. 11). Это представление стало практически общепринятым среди сейсмологов (см., например, Кейлис-Борок, 1968).

Выделенные нами этапы развития сейсмических исследований мантии таковы:

1) период их становления, характеризующийся однозначной трактовкой первых скоростных моделей мантии (от возникновения термина "мантия" и начала ее исследований в 1897 г. до конца 20-х годов, когда после первой мировой войны возникают предпосылки для изучения мантии всей Земли);

2) классический период, в который сейсмологи приходят к отрицанию однозначности оценки каждого скоростного разреза, построенного по данным одной станции, и однозначно оценивают лишь стандартный скоростной разрез (20-50-е годы XX в.);

3) современный период - период осознания вероятностно-статистического характера представлений о строении мантии и попыток преодолеть получающуюся в результате неопределенность (начиная с 1957 г., когда возникли условия для детального изучения мантии с помощью глобальных международных исследований).

Поскольку количество сейсмических данных нарастало неравномерно и темп исторического развития за последние 15-20 лет чрезвычайно ускорился, то, естественно, этому периоду уделено больше внимания. Кроме того, мы сочли необходимым несколько подробнее остановиться на узловых, принципиальных моментах в истории исследования мантии (например, дискуссия Гутенберга и Джеффриса, доказательство существования волновода и горизонтальных неоднородностей) и показать, что они неразрывно связаны с изменением научных подходов.

Автор глубоко благодарен руководству Межведомственного геофизического комитета и лично В.В. Белоусову, Б.С. Вольвовскому, А.Д. Повзнеру, А.Г. Родникову и Б.И. Сидкину за предоставление возможности проделать и опубликовать данное исследование, а также И.В. Батюшковой, Н.А. Беляевскому, Э.Н. Бессоновой, А.А. Борисову, В.С. Вадковскому, Л.П. Виннику, И.С. Вольвовскому, В.П. Головкову, Д.И. Гордееву, Г.П. Горшкову, В.И. Кейлису-Бороку, А.Л. Левшину, Ю.В. Ризниченко, В.З. Рябому, Е.Ф. Саваренскому, В.В. Федьинскому и Ю.К. Шукину за консультации и обсуждение работы.

<sup>1</sup> Д.И. Гордеев. История геологических наук, ч. I. От древности до конца XIX в. М., Изд-во МГУ, 1967; ч. II. От конца XIX в. до середины XX в. М., Изд-во МГУ, 1972.

Здесь и далее в подстрочных примечаниях даются ссылки на работы, не имеющие непосредственного отношения к сейсмическим исследованиям мантии и не вошедшие в библиографический указатель.

## ОДНОЗНАЧНАЯ ТРАКТОВКА ПЕРВЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О МАНТИИ (1897 Г. — 20-е ГОДЫ XX В.)

### 1. СТАНОВЛЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ МАНТИИ

Впервые термин мантия (нем. Steinmantel — каменная оболочка, сокращенное затем до Mantel) ввел в науку профессор Геттингенского университета Э. Вихерт (Wiechert, 1896, 1897). В 1897 г. он провел первые теоретические расчеты плотности Земли (Wiechert, 1897) и выдвинул идею двухслойного, не считая коры, строения планеты: внутри металлическое ядро (Кем.), его окружает каменная оболочка (мантия), плотность которой меняется мало и приблизительно равна 3–3,4 г/см<sup>3</sup>. Толщина мантии колеблется, по его представлениям, от 1200 до 1600 км. Примерно с 1940 г. введенный таким образом термин стал общепринятым, хотя до того чаще употреблялся другой — Shell — оболочка.

Изучение подкорового слоя шло первоначально в рамках общего процесса исследования недр. Уже в начале нашего века было ясно, что ответ на вопросы, связанные с его изучением, с помощью прямых изысканий невозможен, поэтому разрабатываются косвенные методы. Наиболее надежным и плодотворным из них, по общему мнению, является сейсмология (см., например, Вихерт, 1911).

Основными факторами, способствовавшими развитию сейсмических исследований мантии, были создание инструментальной базы и развитие теории распространения волн, приведшее к созданию методов количественной интерпретации сейсмических данных.

Становление сейсмологии кратко описывает виднейший английский сейсмолог и геофизик К. Буллен, много лет проработавший в Австралии: "Основы инструментальной сейсмологии были заложены примерно в середине XIX в., когда Малле предложил организовать сеть обсерваторий и разместить их по всей земной поверхности, а Пальмиери в Италии изобрел сейсмограф, способный регистрировать отдаленные землетрясения...

... Существенный шаг вперед был сделан в 1892 г. Милном (в Японии) и его сотрудниками Коттом, Юингом и Греем. Милн разработал достаточно компактный и простой в обращении сейсмограф, что дало возможность установить его во многих частях света. С этого времени начинается сбор и накопление точных инструментальных данных о землетрясениях, и сейсмология начинает превращаться из качественной в количественную дисциплину" (Буллен, 1966, стр. 10).

Первые сейсмические станции в Польше строятся в 1899 и 1903 гг., в Болгарии — в 1905 и 1912 гг., в Венгрии — в 1902 г., в Румынии — в 1899 г. и в Чехословакии в 1924 г. (Батюшкова, 1962 и др.). В России в 1898 г. инструментальные наблюдения над сейсмическими явлениями ведут всего три станции, да и те расположенные в Европейской части страны (Вознесенский, 1899), к 1903 г. число станций увеличивается до 17 (Голицын, 1960) и 1910 г. — до 20; к 1913 г. под руководством Б.Б. Голицына было организовано еще 6 станций первого, 12 станций второго разрядов и Центральная станция в Пулкове (Кирнос, 1957).

Развивается и мировая сеть сейсмических станций. В 1907 г. Э. Вихерт отмечал: "В настоящее время существует уже около 100 станций с приборами, регистрирующими практически все землетрясения..., появление волны регистрируется с точностью до 1-2 сек" (Вихерт, 1911, стр. 26).

Успехи сейсмологии в конце XIX – начале XX в., помимо создания инструментальной базы, в значительной степени обязаны развитию прикладной математики, особенно в области изучения волнового движения. Краткий обзор этих достижений также можно найти у Буллена: "Уже в 1828 г. Коши и Пуассон получили уравнения движения для идеально упругих твердых тел, и тогда же Пуассон показал, что в этих телах могут распространяться два типа объемных волн (в сейсмологии обозначаемых, как P- и S-волны) с различными скоростями. Стокс показал, что это соответственно продольные и поперечные волны... Грин изучал отражение и преломление упругих волн на границе двух сред.

Затем последовали работы Кельвина, Кирхгофа, Релея, включая теорию поверхностных волн Релея..." (Буллен, 1966, стр. 11).

Достижения теории распространения сейсмических волн привели к первоначальным качественным оценкам характера регистрируемых волн: в 1889 г. Вихерт высказывает предположение, что первые фиксируемые сейсмографом волны или группы волн, которые имеют обычно период не более 13 сек и сравнительно небольшую амплитуду и называются предвестниками землетрясений, представляют собой продольные и поперечные волны, проходящие значительные толщи Земли. Распространяющиеся же на небольшой глубине и мало гасимые поверхностные волны резко выделяются на записи и образуют группу так называемых главных волн (Вихерт, 1911).

Прошло несколько лет, прежде чем это мнение разделили другие сейсмологи. Одним из первых после Вихерта отождествил на сейсмограммах продольные, поперечные и поверхностные волны в 1897 г. английский сейсмолог Р. Олдгем.

Итак, к началу XX в. стало ясно, что сейсмограммы представляют собой тот первичный материал, обрабатывая который можно судить о внутреннем строении планеты.

## 2. ПЕРВЫЕ СКОРОСТНЫЕ МОДЕЛИ МАНТИИ. ОДНОЗНАЧНОСТЬ ТРАКТОВКИ ПОЛУЧАЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В 1903–1906 гг. Х. Бенндорф в Германии (Benndorf, 1905, 1906), а также Дж. Милн (Miln, 1903) и Р. Олдгем (Oldham, 1906) в Англии впервые попытались определить количественно изменение скоростей сейсмических волн с глубиной, но это привело лишь к установлению порядка величин (сб. "Внутреннее строение Земли", 1949).

Реальной оценка скоростной модели и мантии становится в 1907 г., когда Э. Вихерт, основываясь на теоретических положениях немецкого математика Г. Герглетца (Herglotz, 1905, 1907), создает прямой, практически осуществимый метод определения скоростей сейсмических волн на разных глубинах. Основная заслуга Вихерта заключалась в том, что, используя теорию распространения сейсмических волн и решив совместно с Герглотцем интегральное уравнение сейсмического луча, он установил следующее фундаментальное положение: так как производная по времени годографа (годограф – зависимость времени пробега волн от эпицентрального расстояния), точнее ее обратная величина, определяет скорость распространения волн в точке наиболее глубокого проникновения сейсмического луча, то, измеряя время пробега сейсмической волны на всех больших эпицентральных расстояниях, можно в предположении непрерывности годографа последовательно выяснить закон изменения скоростных параметров с глубиной.

С помощью этого метода Вихерт вывел осредненный закон изменения скоростей сейсмических волн (рис. 1). В 1907 г. он сообщает о первых результатах расчетов на основании составленного им и его учеником

К.Цёшпритцем годографа (Wiechert, 1907; 1907<sub>1</sub>; Zöppritz, 1907):

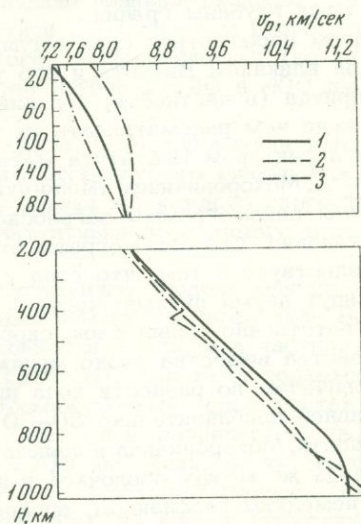
$H$ , км	0	500	1000	1500
$v$ , км/сек	7,17	9,23	11,07	12,72

(цит. по кн. Голицына, 1960, стр. 275).

Итак, до глубин 1500 км продольные и поперечные волны ускоряются. На глубине 1500 км их скорости резко уменьшаются (например, продольные волны замедляются с 13 до 10 км/сек), а затем остаются постоянными. На этом основании авторы делают вывод о верности гипотезы, утверждающей, что Земля состоит из железного ядра и каменной оболочки; граница между оболочкой и ядром лежит, по их мнению, на глубине 1500 км.

Рис. 1. Первые скоростные разрезы верхней мантии (начало XX в.)

- 1 - данные Б.Б. Голицына (Galitzin, 1917);
- 2 - Э. Вихерта (Wiechert, Geiger, 1910);
- 3 - С. Мохоровичича (S. Mohorovičić, 1915)



Представления Вихерта о глубине залегания раздела между корой и мантией связаны с изучением подкорового пластичного слоя. Глубину прослойки, отделяющей кору от мантии, Вихерт оценивал, исходя из того, что длина волн при землетрясениях чаще всего равна 63 км. Это навело его на мысль, что такова длина волны собственных колебаний земной поверхности. Но, как известно, в стоячей волне толщина колеблющегося слоя (в данном случае коры) равна половине длины волны. Значит, толщина коры и соответственно глубина залегания кровли мантии равны 31,5 км (Wiechert, Geiger, 1910).

Как мы видим, эти работы характеризуются четко однозначным отношением к полученным результатам. Вихерт, осознавая приближенный характер своих результатов, на их основании все-таки утверждает, что существует более или менее однородная подкоровая оболочка, и к 1907-1910 гг. устанавливает пределы ее глубины - от 31,5 до 1500 км.

К этому же времени относится попытка выяснить строение Земли на основе только данных сейсмологии. Ее предпринимает Р.Олдгем (Oldham, 1906). Он строит первые приемлемые годографы для прямых продольных и поперечных волн. Обратив внимание на то, что времена их пробега с увеличением эпицентрального расстояния растут значительно медленнее, чем следует из теоретических соображений при однородной сфере, он пришел к выводу о росте скоростей сейсмических волн с глубиной и о существовании внутри планеты области, где скорости, наоборот, значительно меньше, чем во внешних слоях. Хотя Олдгем не настолько доверял своим данным, чтобы проводить с ними расчеты, он все-таки пришел к выводу, что под корой лежит слой, более однородный по своему составу и свойствам. Толщина этого слоя 3800 км. Глубже расположено ядро (толщиной 2600 км). В дальнейшем, поняв, что годографы продольных волн он трактовал ошибочно, т.е. времена прихода различных фаз расценивал как время прихода начальной фазы колебаний, Олдгем

пересмотрел свои взгляды на строение Земли, и в частности на строение мантии (Oldham, 1913). Ее верхнюю границу он считал находящейся на глубине 30 км. Олдгем обнаружил также раздели на глубинах 50 и 100 км и резкий скачок скоростей на глубине 2500 км. Эту границу он интерпретировал как переход от мантии к ядру. Саму мантию он расценивал как "оболочку, занимающую по глубине  $1/2 - 3/5$  радиуса и состоящую из вещества, которое нельзя назвать ни твердым, ни жидким... Оно устойчиво по отношению к напряжениям короткой продолжительности..., но в то же время способно поддаваться воздействию малых напряжений, если они действуют в течение длительного времени..." (цит. по Гутенбергу, 1963, стр. 31).

В работах Олдгема ясно видна та же, что у Вихерта, однозначность оценок – скоростная модель есть приближение к истине, уточняться и меняться могут лишь глубины границ.

Олдгем пересмотрел свои взгляды на строение мантии в значительной степени под влиянием Вихерта и его учеников – Л.Гейгера, Б.Гутенберга и К.Цёшпритца (в частности, под влиянием работы Zöppritz, Geiger, 1909). Но, прежде чем рассматривать их работы, остановимся на исследовании, проведенном директором Института метеорологии и гидродинамики в Аграме (Загреб) – А.Мохоровичичем (Mohorovičić, 1910).

Изучая сейсмограммы загребского землетрясения 8.X 1909 г., Мохоровичич установил, что сейсмографы отмечают два вступления волн *P* и *S*. Это свидетельствует о том, что одна и та же волна регистрируется дважды, т.е. волны идут двумя путями: часть – прямо, а часть – преломляясь, отражаясь, и соответственно меняя свою скорость на какой-то границе внутри Земли, где свойства вещества резко меняются. Глубина такой границы, вычисленная Мохоровичичем по разности хода прямых и отраженных *P*- и *S*-волн, оказалась равной приблизительно 50–60 км. Она получила название границы, или поверхности, Мохоровичича и поныне считается разделом между корой и мантией.

Граница же между оболочкой и ядром была установлена в 1914 г. выдающимся немецким геофизиком, впоследствии переехавшим в США, – Б.Гутенбергом, обнаружившим, что на глубине 2900 км скорость продольных волн уменьшается от 13,25 до 8,5 км/сек, т.е. радиус ядра приблизительно равен 3500 км (Gutenberg, 1914).

Таким образом, к 1914 г. были установлены верхняя и нижняя границы мантии. Они получили название поверхностей раздела первого порядка. На них резко меняются свойства земных недр, что вызывает скачкообразное ускорение или замедление сейсмических волн (скачок скоростей). Определению менее резких границ, так называемых границ второго рода, на которых скачком меняются лишь градиенты скоростей, были посвящены работы Э. Вихерта, Л.Гейгера, Б.Гутенберга и К.Цёшпритца.

Л.Гейгер, применяя метод Вихерта, уточнил распределение скоростей сейсмических волн с глубиной по нескольким годографам, в том числе по годографу Олдгема (Zöppritz, Geiger, 1909; Wiechert, Geiger, 1910).

К.Цёшпритц внес большой вклад в теорию сейсмических исследований. Он первым изучил распределение сейсмической энергии при отражении и преломлении волн на поверхностях разрыва в недрах Земли и первым указал, что о внутреннем строении планеты, и в частности о существовании границ второго рода, можно судить по соотношению амплитуд отраженных и прямых сейсмических волн (*PP:P*) (Zöppritz, Geiger, Gutenberg, 1912). Метод, созданный Цёшпритцем, развили Гейгер и Гутенберг (Geiger, Gutenberg, 1912). В результате они (Zöppritz, Geiger, Gutenberg, 1912) обнаруживают, что закон, связывающий изменение сейсмических волн и глубину, меняется на трех глубинах:

$H$ , км	0	1193 $\pm$ 50	1712 $\pm$ 100	2454 $\pm$ 100
$v$ , км/сек	7,17	11,80	12,22	13,29

Это и есть раздели второго рода в мантии. Дальнейшее исследование показало, что граница 1193  $\pm$  50 км соответствует определенному ранее Вихертом и Цёшпритцем разделу на глубине 1500 км.

Так, первая же попытка использовать амплитуды волн для изучения строения Земли (Zöppritz, Geiger, Gutenberg, 1912) привела к тому, что эта граница "переместилась" выше на 300 км, а в дальнейшем, по мере уточнения времен пробега волн и способов расчета по ним глубин, она становится еще менее "глубокой", и к 1959 г. ее относят к глубине 950 км, т.е. в 1907 г. Вихерт определил не границу ядра и мантии, а уточненный в дальнейшем раздел второго рода.

Эти представления позднее проверил сын известного хорватского сейсмолога С. Мохоровичич, применяя свой метод редукции годографа. Подтвердив уже существующее мнение о строении Земли, и в частности мантии, он получил, кроме того, дополнительные результаты (см. рис. 1). Основной смысл его выводов заключается в том, что, подобно Гейгеру и Цёпприцу, С. Мохоровичич считает вполне твердо установленными следующие границы раздела: 1) Мохоровичича; 2) границы между ядром и мантией и 3) границы второго рода в мантии около 1200 и 1700 км. Кроме того, он предполагает (но не утверждает), что в мантии есть еще разделы на глубинах 120 и 400 км (S. Mohovičić, 1915).

Анализ исследований Л. Гейгера, Б. Гутенберга, С. Мохоровичича и К. Цёпприца показывает, что в этих работах уточняются глубины границ или добавляются новые, не замеченные ранее детали, оценка же каждого скоростного разреза, определяемого формой годографа, интуитивно проводимого в облаке точек, абсолютно однозначна.

Добавление новых деталей, естественно, усложнило модель мантии. Например, открытие границ второго рода привело немецкого геофизика В. Клусмана (Klussman, 1915) к мысли о многослойности Земли, и в частности мантии, которая, по его мнению, "до глубины 1200 км... сложена горными породами, между 1200 и 2900 км находится промежуточный слой, состав которого соответствует составу железной руды. Этот слой разделяется, в свою очередь, на две части по нерезкой границе 1700 км" (цит. по кн. Багюшкова, 1966, стр. 92). Эти взгляды можно считать предчувствием будущей "смуты".

Действительно, по современным представлениям, не всегда существует четкий раздел между корой и мантией, возможны области перехода; мантия, в свою очередь, представляется слоистой; идут споры, что считать корой, тектоносферой. Однако большинство геофизиков придерживается классических представлений (кора, мантия, ядро), и мы будем пока рассматривать эволюцию представлений о мантии в этих рамках.

Большой вклад в уточнение границ раздела в мантии внесли исследования видного русского геофизика Б.Б. Голицына. Как и Вихерт, он считал сейсмический метод одним из самых важных при изучении земных недр. Его теоретическая и практическая работы в этой области получили мировое признание. Не случайно на Манчестерском съезде Международной сейсмологической ассоциации, собравшем выдающихся сейсмологов того времени, он был единогласно избран председателем ассоциации на 1912-1914 гг. (Голицын, 1960, стр. 42). В результате многолетних трудов по созданию приборов, по организации сети станций и разработке новых сейсмических методов Голицын смог оригинально, по-своему подойти к проблеме глубинного строения планеты.

Одно из самых значительных его исследований — изучение внутреннего строения Земли на основе сейсмических данных. Исследование было закончено в 1913 г. В мае 1914 г., на заседании Постоянной центральной сейсмической комиссии при Академии наук Голицын сделал доклад "О внутреннем строении Земли", в котором изложил суть нового метода, созданного им для исследования подкорковых слоев, а также основные результаты проделанной работы ("Протокол заседания...", 1915, стр. LIX). В 1917 г. уже после смерти автора текст доклада был издан отдельным оттиском на французском языке (Galitzin, 1917), а затем переиздан в 1919 г. (Голицын, 1919). На русском языке работа вышла в свет лишь в 1960 г. (Голицын, 1960, т. II). Новизна метода Голицына состояла в разработке и определении направления распространения (угла выхода) продольной волны на основании динами-

ческих данных (амплитуда колебаний по трем компонентам), т.е. исходя из направленных смещений точек поверхности, вызываемых колебанием продольной волны.

На основе анализа 110 различных землетрясений, записанных приборами в Пулково в 1912 и 1913 гг., Голицын выяснил характер изменения углов выхода сейсмической радиации  $\epsilon$  по мере удаления от эпицентра.

Правда, углы  $\epsilon$  можно определить и путем дифференцирования эмпирического годографа, что и делал Э. Вихерт. Однако, по мнению Голицына, метод Герглотца – Вихерта связан с большими практическими затруднениями и в то же время не обеспечивает достаточно высокой точности: так как эмпирический годограф сглажен, то некоторые детали зависимости  $\epsilon$  от эпицентрального расстояния  $\Delta$  могут остаться незамеченными. Этот недостаток устраняется при прямом измерении. Метод Герглотца – Вихерта осложнен еще и тем, что при его использовании необходимо знание скорости сейсмических волн у поверхности  $V_0$ , а ее трудно определить из-за слоистости земной коры.

Однако вернемся к работе Голицына. Вид полученной Голицыным кривой, показывающей изменение направления выхода сейсмических волн при удалении от очага землетрясения, весьма интересен, особенно ее понижения при  $\Delta = 2000-3000, 6700$  и  $8000$  км. Это как раз те особенности, которые не выявляются при дифференцировании экспериментального годографа. Они-то, по мнению Голицына, и свидетельствуют о том, что внутри планеты имеются особые поверхности или слои, где физические свойства вещества, и соответственно скорости сейсмических волн, претерпевают более или менее резкие изменения.

Для уточнения глубин залегания этих поверхностей по полученным значениям  $\epsilon$  и экспериментально определенным (на станциях Пулково, Иркутск и Ташкент) скоростям сейсмических волн в верхних слоях коры Голицын построил годограф, неплохо согласующийся с годографом Вихерта. Затем он предложил весьма интересные методы расчета скоростей сейсмических волн с учетом углов выхода (по его собственной методике). С помощью одного из этих методов он вычисляет средний закон изменения скоростей сейсмических волн с глубиной (см. рис. 1). Проведя затем сравнительный анализ вычислительных методов, Голицын пришел к выводу, что наиболее общим и точным из них является метод, разработанный по его просьбе известным русским математиком А.А. Фридманом. Воспользовавшись этим методом, Голицын нашел глубины четырех поверхностей, разделяющих слои с различными физическими свойствами.

$H$  км

106

232

492

}      установлены впервые

1442 – согласуется с критической поверхностью 1519, установленной Вихертом.

Затем он проинтерпретировал границы раздела, рассмотрев различные гипотезы, объясняющие их физическую природу. Голицын обратил внимание на то, что раздел 106 км близок к глубине 120 км, на которой, по данным геодезических исследований, находится изостатическая поверхность. Это привело его к мысли, что, по-видимому, здесь начинается магматический слой, в котором твердое вещество находится в пластическом состоянии. Не исключено также, что этот слой простирается до второй критической поверхности – 232 км, т.е. его толщина – 126 км. Третью поверхность – 492 км – он расценил как возможную подошву земной коры (Голицын, 1960, стр. 357), а раздел 1200 км – как вероятную нижнюю границу каменной оболочки (Голицын, 1960, стр. 358).

Для обоснования своих взглядов он привел расчеты изменения температуры, давления, плотности и модуля сдвига с глубиной и пришел к выводу, что хотя действие высокой температуры и уменьшает плотность вещества, но это компенсируется возрастанием давления, поэтому "в тех физических условиях (очень высокая температура и огромное давление) вещество должно находиться в полупластическом состоянии, способном передавать чисто поперечные волны" (Голицын, 1960, стр. 360). И хотя Голицын понимал, что существование та-

кого необычного слоя на глубинах 100–250 км – не более, чем гипотеза, он подчеркивал, что "во всяком случае гипотеза о пластическом состоянии вещества внутри Земли хорошо согласуется с результатами прямых наблюдений".

Этот вывод предвосхитил дальнейшие события. Достаточно сказать, что сам Б. Гутенберг, сумевший впоследствии с помощью сейсмических данных доказать существование этого слоя, пришел к такому же выводу лишь десятилетие спустя после работы Голицына. Еще в 1925 г. строение нашей планеты он расценивал так: "Не считая верхних 60 км коры, Земля состоит из оболочки, простирающейся до 1200 км, имеющей, по-видимому, небольшую границу разрыва на глубине 400 км; из промежуточного слоя, лежащего на глубине от 1200 до 2900 км и имеющего незначительные неправильности (на глубине 2400 км скорость сейсмических волн начинает несколько убывать); и, наконец, из ядра, начинающегося с глубины 2900 км..." (Гутенберг, 1935, стр. 35).

Открытие Голицыным третьей границы (492 км) тоже оказалось весьма существенным. Дальнейшие исследования показали, что она лежит у кровли слоя, где скорость сейсмических волн очень быстро возрастает. Она является, по мнению Гутенберга, даже более устойчивой особенностью строения Земли, чем астеносфера (Гутенберг, 1963, стр. 98). Много лет спустя астеносфера получила название слоя Гутенберга, а лежащему ниже слою (по современной терминологии, слою С) было присвоено имя Голицына.

Было бы неправильным обойти молчанием то обстоятельство, что после смерти Голицына почти 40 лет никто не занимался развитием и усовершенствованием его метода. Понятны сомнения, которые впоследствии вызвали те или иные аспекты работы Голицына. Например, Гутенберг не был уверен в правоте Голицына, интерпретировавшего минимумы на кривой  $e(\Delta)$  как доказательство существования границ разрыва на определенных глубинах (Гутенберг, 1935). Впоследствии возникло мнение, что из физических соображений вообще трудно утверждать реальность существования этих минимумов. Скорее, они – результат недостаточной разработанности во времена Голицына теории сейсмических волн, недостаточной точности наблюдений или учета волн от глубоководных землетрясений, в то время как глубиной очага Голицын пренебрегал, а кривую  $e(\Delta)$  надо проводить более сглаженно (Саваренский, 1952; Саваренский, 1955; Саваренский, Кирнос, 1949).

Однако непонятно, почему исследование Голицына осталось в тени. Действительно, сейсмологи десятилетиями уточняли скоростной разрез Земли методом Герглотца – Вихерта, но ни один исследователь не пошел по пути Голицына и даже не сослался на сходство результатов, а ведь установленные Голицыным границы, как видно из табл. 1, хорошо согласуются с некоторыми данными других авторов, полученными позднее и иными методами, и могли бы послужить подтверждением этих позднейших исследований.

Таблица 1

Глубины залегания (в км) некоторых границ  
второго рода

Данные Голицына	Данные других авторов
106	120 (S. Mohorovičić, 1915)
232	225 (Dahm, 1936)
492	400 (Byerly, 1926 и Mohorovičić, 1915)
1442	1400 (Repetti, 1928)

Даже Гутенберг, отметивший труд Голицына, вероятнее всего, получил о нем представление по реферату. В своей монографии, посвященной внутреннему строению Земли, он писал: "Первая попытка вывести заключение о внутреннем строении Земли на основе наблюдений над углами падения сейсмических волн была сделана Гутенбергом в 1915 г." (имеется в виду краткое сообще-

ние в журнале "Beitrage zur Geophysik". После этого в 1917 г. Б. Голицын воспользовался тем же методом (Гутенберг, 1935, стр. 24). Не говоря уже о том, что Голицын умер в 1916 г. и поэтому никак не мог что-то делать в 1917 г., в самом тексте его статьи ясно говорилось, что работа по измерению углов выхода велась в 1912-1913 гг.

После Голицына только Е.Ф. Саваренский (почти 40 лет спустя) при изучении скоростного разреза подкорковых слоев обратился непосредственно к исследованию углов выхода сейсмической радиации.

Не исключено, что метод Голицына не снискал себе сторонников из-за большой трудоемкости прямого измерения углов выхода; тут существенна и расстройка приборов, и влияние свойств корковых слоев. Но тем значительнее представляется в этой связи заслуга Голицына, сумевшего осуществить измерения, поражающие своей точностью.

Труд Голицына был хорошо теоретически обоснован и оригинален по существу: автор разработал и свой метод измерения углов выхода, и методы расчета по ним скоростей; экспериментальной же базой послужили результаты первых точных измерений углов выхода сейсмической радиации, выполненные в Пулкове, на первоклассной сейсмической станции, созданной самим Голицыным и оборудованной приборами его системы. Эта работа ничуть не уступала лучшим европейским исследованиям того времени, вычисленные же Голицыным времена пробега прекрасно согласуются с временами пробега, приведенными в годографе 1940 г., построенном на основании обширного экспериментального материала (Саваренский, Кирнос, 1949).

Несмотря на самобытность работы Голицына, по подходу к оценке результатов она не отличалась от зарубежных исследований. Как и другие создатели первых скоростных разрезов мантии, Голицын совершенно однозначно трактовал свои результаты. Он был убежден, что ему удалось открыть не замеченные ранее границы в мантии именно вследствие того, что его метод давал наиболее точное (лимитируемое лишь погрешностями прямых измерений) представление об ее истинном строении.

## ВЫВОДЫ

Итак, в середине 20-х годов XX в. закончился первый, предварительный, этап развития сейсмических исследований мантии, период их становления.

Он характеризуется: 1) созданием аппаратуры для регистрации землетрясений, организацией отдельных сейсмических станций и построением первых экспериментальных годографов; 2) разработкой основ теории распространения сейсмических волн в недрах Земли, созданием методики интерпретации экспериментальных данных и формированием с ее помощью общих представлений об особенностях изменения с глубиной скоростей распространения в мантии сейсмических волн.

Этому периоду свойственна однозначная трактовка результатов сейсмических исследований мантии: каждый скоростной разрез, строящийся по годографу одной станции, интуитивно проводимому в облаке точек, рассматривается как более или менее точное приближение к истине. Форма годографа определяет скоростной разрез, который, по мнению исследователей, дает представление о строении мантии всей планеты. Степень соответствия реальности зависит, по мнению авторов, лишь от точности измерений и чувствительности методов построения годографов к деталям строения мантии. Каждая последующая работа лишь уточняет глубины намеченных ранее границ или добавляет не замеченные ранее детали.

В результате такого научного подхода возникает представление о сферически-симметричной подкорковой оболочке Земли, определяется ее верхняя и нижняя границы и внутри нее устанавливаются некоторые разделы второго рода, а также высказывается предположение о наличии в мантии пластичного слоя и слоя с быстро увеличивающейся плотностью.

## ГЛАВА II

### ЗАРОЖДЕНИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ВОЗМОЖНОЙ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ (20—50-е ГОДЫ XX В.)

В 20—50-е годы нашего века в результате совершенствования сейсмографов и увеличения сети сейсмических станций количество данных о мантии возросло. Это привело, с одной стороны, к усложнению модели мантии — (представлению о ее слоистости), а с другой — к возникновению сомнений относительно точности и достоверности получаемых результатов. Наиболее четко неопределенность получаемых данных стали понимать после 1926 г. — года открытия 20<sup>0</sup>-й границы. Дискуссии о природе этой границы и связанные с ней исследования привели к осознанию неоднозначности в интерпретации отдельных годографов, к выработке стандартных, осредненных для планеты, скоростных разрезов мантии и к их однозначной оценке.

#### 1. РОСТ КОЛИЧЕСТВА СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ О СТРОЕНИИ МАНТИИ. ВОЗНИКНОВЕНИЕ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ В ОЦЕНКЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

После первой мировой войны в связи с бурным промышленным ростом многие страны испытывали потребность в освоении сейсмоактивных районов. Это привело к широкому внедрению достаточно совершенных сейсмографов (Омори, Вихерта). В частности, стал широко внедряться разработанный ранее Б.Б. Голицыным способ преобразования колебаний Земли в электрический ток. То, что Голицын создал гальванометрический метод регистрации землетрясений, ввел электромагнитное затухание, давшее возможность записывать колебания Земли без наложенных на них собственных колебаний маятника, открыло новые горизонты в сейсмологии (Саваренский, 1970). Создал свой первоклассный сейсмограф Беньофф.

Кроме внедрения новых приборов, происходило расширение сейсмической сети. Например, в СССР после революции возрождались и расширялись созданная Голицыным сеть сейсмических станций. С 1927 по 1938 г. было построено 15 региональных станций в Средней Азии, Крыму, на Кавказе; кроме того, работали 7 станций I класса, открытых перед первой мировой войной. В 1949—1953 гг. эта сеть была реорганизована под руководством Г.Д. Гамбурцева: были выделены телесеismicкие, региональные станции и станции общего типа (Кирнос, 1957). В результате число советских станций возросло более, чем втрое (Кирнос, Харин, Шебалин, 1961).

Аналогичный процесс шел во всем мире. Создаваемая в 20—50-е годы мировая сеть могла собирать материал, дающий представление о строении Земли в целом. В 1959 г. Г. Джеффрис отмечал, что в мире работало уже около 500 станций.

В области интерпретации сейсмических данных в эти годы подтвердилась плодотворность вихертовского метода. Достаточно сказать, что решение Э. Вихертом и Г. Герглотцем интегрального уравнения сейсмических лучей породило серию публикаций, посвященных изучению скоростей сейсмических волн на раз-

ных глубинах. Кроме работ, на которых мы уже останавливались (Wiechert, Geiger, 1910; Zöppritz et al., 1912; Geiger Gutenberg, 1912; Gutenberg, 1914; S. Mohorovičić, 1915), такого же рода исследования велись и в 20-40-е годы (Gutenberg, 1923, 1927, 1930; Knott, 1919; Repetti, 1928; Witte, 1932; Wadati et al., 1933-1934; Gutenberg, Richter, 1934-1936; Dahm, 1934, 1936, 1936<sub>1</sub>) (рис. 2).

Основной итог этой кропотливой работы по собиранию, интерпретации и сопоставлению сотен сейсмограмм состоял в уточнении границ раздела второго рода (Макелвейн, 1949). Б.Гутенберг, посвятивший этому более 25 лет, к 1930 г. считал, что поверхности разрыва находятся на глубинах 1200, 1900 и 2150 км. В 1935 г. Б.Гутенберг и К.Рихтер относили их к тем же глубинам (Gutenberg, Richter, 1935). Американский сейсмолог У.Репетти утверждал, что границы раздела второго порядка в мантии лежат на глубинах 1400, 1860 и 2100 км. Указанные глубины хорошо согласуются с данными Гутенберга, но большинство сейсмологов считали это случайным совпадением из-за большого разброса амплитуд и различия годографов. Кроме того, Репетти рассчитал глубину еще одной границы - 937 км и представил сейсмограммы, на которых обнаружены отражения от нее (Repetti, 1928). Работы немецкого сейсмолога Х.Витте и его американского коллеги К.Дама (Witte, 1932; Dahm, 1934, 1936, 1936<sub>1</sub>) подтвердили существование этой границы, хотя они считали, что ее глубина 950 км и граница не так резка, как полагал Репетти. Тем не менее она оказалась впоследствии очень важной для понимания внутреннего строения Земли (она расположена у подошвы слоя, получившего в дальнейшем название верхняя мантия).

Дам (Dahm, 1936<sub>1</sub>) вычислил, что в районе Калифорнии граница в мантии проходит на глубине 225 км. Американский сейсмолог П.Байерли (Byerly, 1926) привел данные о границе раздела на глубине около 400 км, отметив, что С.Мохоровичич тоже обнаружил эту границу в 1915 г.

Отметим для полноты изложения, что в 1919 г. англичанин К.Кнотт построил кривые изменения скоростей с глубиной, из которых "вырисовывались" разделы на глубинах 80, 700, 1300-1400 и 3000 км, а японец Р.Ямамото в 1924 г. провел исследование на основании материалов, полученных до 1906 г., а также по данным японского землетрясения 1923 г. Но его данные впоследствии сейсмологи не использовали, так как он, по словам Гутенберга, "предполагал существование для всех глубин особой функции скорости и опирался на устаревшие наблюдения" (Гутенберг, 1935, стр. 32).

Основные результаты работ по определению границ в мантии можно свести в таблицу, дополняющую данные Бугаевского (1960<sub>2</sub>) (табл. 2).

В итоге к концу 30-40-х годов уже сформировалось представление о том, что мантия представляет собой "равномерно наслоенное тело вращения" (определение, которое несколько ранее советский геофизик П.М.Никифоров сформулировал для Земли в целом). В 1939 г. Дж. Макелвейн (США),

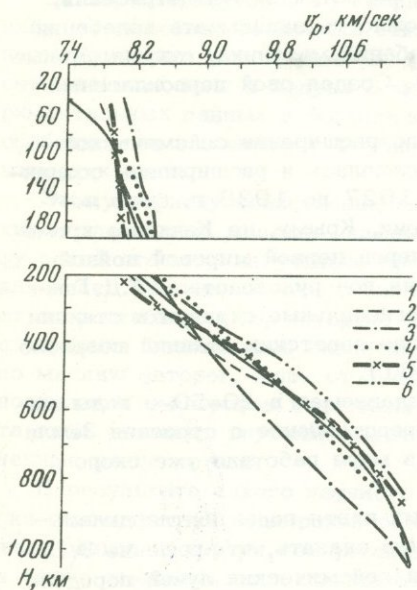
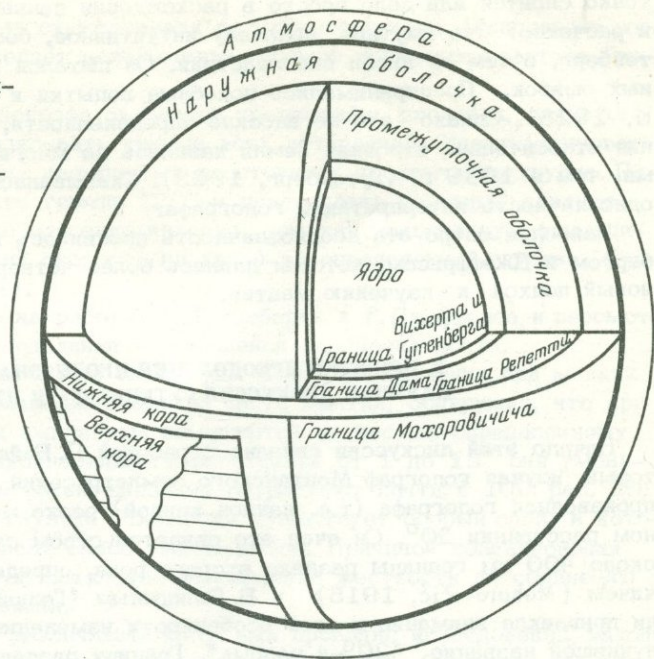


Рис. 2. Скоростные разрезы верхней мантии, построенные в 30-е годы XX в. 1 - Вадати и Оки (Wadati et al., 1933-1934); 2 - Витте (Witte, 1932); 3 - Репетти (Repetti, 1928); 4 - Графа (за 1932 г. цит. по кн.: Внутреннее строение Земли, 1949); 5 - Дама (Dahm, 1934, 1936, 1936<sub>1</sub>); 6 - Б. Гутенберга и Рихтера (Gutenberg, Richter, 1935)

Рис. 3 Строение Земли, полученное в результате анализа сейсмических данных в 1939 г. Данные Дж.Макелвейна (из кн: Внутреннее строение Земли, 1949)



резюмируя современные представления, графически выразил схематический разрез планеты так, как показано на рис. 3. Толщину наружной оболочки (по современной терминологии, "верхней мантии"), в которой скорость упругих волн, а следовательно и отношения упругости и плотности, быстро возрастает с глубиной, он оценивал в 950 км.

Однако большое количество данных и возникающие расхождения в определении глубин границ у различных авторов поставили перед исследователями вопрос: в чем причина такого разнообразия цифр? Действительно ли мантия так

Таблица 2

Данные о глубинах границ в мантии

Год	Исследователи	Глубина границ, км
1907	Вихерт, Цёшпритц	1500
1910	Вихерт, Гейгер	31,5
1910	А. Мохоровичич	50-60
1912	Цёшпритц, Гейгер, Гутенберг	1193±50; 1712±100; 2454±100
1912	Гейгер, Гутенберг	1194±50; 1677±100; 2436±150
1913	Олдгем	50; 100; 2500
1914	Гутенберг	2900
1914	Голицын	106; 232; 492; 1442
1915	С. Мохоровичич	50-60, 120, 1700, 2900
1915	Клуссман	1200, 1700, 2900
1919	Кнотт	80, 700, 1300-1400; 3000
1926	Байерли	400
1928	Репетти	950; 1140; 1860; 2100
1932	Витте	950
1935	Гутенберг, Рихтер	500-1000; 1800, 2300
1936	Дам	225; 900
1939	Джеффрис, Буллен	400
1941	Саваренский	900
1948	Тресков	900; 1800



тонко слоится или дело просто в расхождении данных из-за ошибок измерений и расчетов? Это смутное, поначалу интуитивное, беспокойство проявил Б. Гутенберг, о чем он писал впоследствии. Он пытался вскрыть причины возможных ошибок. Предпринимались подобные попытки и другими учеными (Wadati, 1928). Однако это не вносило определенности, и к 1949 г. представления относительно строения Земли казались во многих отношениях менее ясными, чем в 1939 г. (Гутенберг, 1963). Сказывалась не сразу осознанная неоднозначность интерпретации годографа.

Наиболее остро эта неоднозначность проявилась в дискуссии между Гутенбергом и Джеффрисом, которая длилась более четверти века и вызвала к жизни новый подход к изучению мантии.

## 2. ПОПЫТКИ ПРЕОДОЛЕНИЯ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ — НАУЧНАЯ ДИСКУССИЯ ГУТЕНБЕРГА И ДЖЕФФРИСА

Начало этой дискуссии связано с работой П. Байерли (Byerly, 1926), который, изучая годограф Монтанского землетрясения 1925 г., заметил, что производная годографа (т.е. наклон кривой) резко меняется при эпицентральной дистанции  $20^\circ$ . Он счел это свидетельством существования на глубине около 400 км границы раздела второго рода, определенной ранее С. Мохоровичичем (Mohorovičić, 1915) и Б. Голицыным (Голицын, 1917). Работа Байерли привлекла внимание к этой особенности изменения скоростей с глубиной, получившей название " $20^\circ$ -й разрыв". Границу раздела в мантии назвали " $20^\circ$ -я граница".

Известный английский сейсмолог Г. Джеффрис в одной из своих ранних работ также предположил (вслед за Байерли) существование  $20^\circ$ -й границы, а затем подтвердил это предположение на первых стадиях своей совместной работы с К. Булленом (Джеффрис, 1960, стр. 126). Наличие этой границы отметили также американец Ф. Нейман (Neumann, 1933) и датская исследовательница Инге Леман (Lehmann, 1934).

Интерпретация обнаруженного явления оказалась чрезвычайно затруднительной. Встали вопросы: 1) где точно находится точка разрыва производной (у разных авторов она варьировала в пределах эпицентральных расстояний от 10 до  $20^\circ$ ); 2) чем этот скачок можно объяснить — петлей голографа или его изломом?

Джеффрис столько раз указывал разные значения глубины этой границы, сколько брался за ее вычисления. В 1936 г. он определяет ее на уровне  $481 \pm 21$  км (Jeffreys, 1936), затем  $415 \pm 32$  км (Jeffreys, 1939), в 1952 г. он пишет: "Если граница, действительно, разрывная, то ее глубина составляет около 500 км". Леман в 1934 г. дает значения между 250 и 350 км (Lehmann, 1934), затем в 1959 г. — между 200 и 250 (Lehmann, 1959; 1959<sub>1</sub>), а с 1960 г. — 215–220 км. После многолетних исследований на сессии Международной ассоциации по сейсмологии и физике земных недр в 1957 г. в Торонто возник вопрос, имеются ли доказательства существования границы раздела на глубине порядка 400 км. По словам Б. Гутенберга, никто не верил в наличие этой границы. Одни полагали, что причиной наблюдаемого сложного характера годографа вблизи  $20^\circ$ -го расстояния могут быть границы раздела на глубинах порядка 200 и 500 км. Другие же вообще сомневались в существовании какой-либо существенной границы на глубинах от 100 и по крайней мере до 900 км (Гутенберг, 1963).

Не более определенной оказалась и интерпретация природы этой границы. Резкое изменение кривизны годографа может свидетельствовать либо о наличии разрыва годографа, либо просто о его изломе. Если считать, что разрыв в годографе отсутствует, то скорости сейсмических волн должны возрастать с глубиной до 400 км, где происходит излом кривой скоростей —  $20^\circ$ -я граница разрыва. Это точка зрения Джеффриса. Если же, как это считает Гутенберг, реален разрыв годографа, то в мантии скорости уменьшаются, ниже точки их минимума они начинают расти и на глубине около 200 км снова

достигают величин, которые существовали до их уменьшения. Наличие же минимума, по его мнению, делает невозможным прямое применение метода Герглотца-Вихерта.

Оценить все детали годографа оказалось чрезвычайно сложным, для этого необходимо было проанализировать кривые всех вступлений. Идентифицировать же различные вступления на упомянутых расстояниях чрезвычайно трудно. Поэтому К. Буллен писал, что термин " $20^{\circ}$ -я поверхность разрыва" следует понимать скорее как общее описание явления, чем как законченную формулировку конкретных изменений скорости на какой-то определенной глубине (Буллен, 1966, стр. 280-281).

Остановимся подробнее на работах Б. Гутенберга и Г. Джеффриса и рассмотрим пути и результаты преодоления выявившейся неоднозначности.

В 1926 г. Гутенберг, исследуя амплитуды волн, возникающих при мелких землетрясениях и пронизывающих внешнюю часть мантии, обнаружил, что при удалении от эпицентра эти амплитуды изменяются по весьма определенному закону: с увеличением эпицентрального расстояния от 1 до  $15^{\circ}$  они уменьшаются экспоненциально, а затем внезапно возрастают почти в 100 раз. Это привело к выводу, что на глубине 75-80 км существует особый слой, в котором скорости продольных волн слабо уменьшаются. Причиной возникновения этого слоя Гутенберг считал локальное уменьшение жесткости по сравнению с лежащими выше и ниже слоями.

Гутенберг много лет и различными методами проводил исследования, находя различные аспекты, подтверждающие наличие астеносферы. Основные его аргументы таковы. Если в мантии существует слой, в котором сейсмические волны распространяются медленнее, чем в слоях, лежащих выше и ниже, то проходя сверху, лучи будут в нем изгибаться [их поведение он рассмотрел в дальнейшем более детально (Gutenberg, 1954), а соответствующие теоретические расчеты провел в 1957 г. Бот (Båth, 1957)]. В результате сейсмические волны выходят на поверхность Земли дальше от источника, чем в том случае, если бы слоя пониженных скоростей не существовало. Между последним лучом, прошедшим выше астеносферы, и первым, коснувшимся ее, на поверхности Земли возникает "пауза", или "зона тени". Зона тени должна быть максимальна, если очаг землетрясения расположен над верхней границей слоя пониженных скоростей, и ее вообще не должно быть, когда очаг землетрясения находится ниже этого слоя.

Изучая сейсмограммы землетрясений, возникших на глубинах от 50 до 260 км, Б. Гутенберг и К. Рихтер показали, что с увеличением глубины фокальной зоны рисунок зоны тени меняется весьма определенным образом: ее площадь максимальна, когда очаги землетрясений расположены на глубинах около 80 км, и она совсем исчезает, если они глубже 200 км (Gutenberg, Richter, 1939), что говорит о наличии волновода в диапазоне 80-200 км.

Затем, в 1945 г. (Gutenberg, 1945) Гутенберг, устанавливая магнитуды глубокофокусных землетрясений по амплитудам  $P$ - и  $S$ -волн, пришел к выводу, что существование зоны тени свидетельствует о минимуме скоростей на глубине около 100 км. Чтобы уточнить, как именно происходит это уменьшение, он исследовал сейсмограммы землетрясений с очагами, расположенными на расстояниях от 4 до  $25^{\circ}$  вокруг Пасадены (Gutenberg, 1948), а затем еще детальнее (Gutenberg, 1954). Полученные им годографы  $P$ - и  $S$ -волн еще раз подтверждают его вывод об уменьшении скорости сейсмических волн на глубине 80-100 км.

Наконец, в 1953 г. Гутенберг разрабатывает способ определения скорости в астеносферном слое по кажущейся скорости  $v^*$  в точке перегиба годографа (Gutenberg, 1953). Проанализировав 82 землетрясения в Японии и ее окрестностях, он строит обобщенный скоростной разрез мантии, из которого следует, что волны  $P$  имеют минимум на глубине около 100, а  $S$  - около 150 км. На этих глубинах скорости на 6% меньше, чем под границей Мохо. Это значит, что вещество здесь обладает меньшей жесткостью, чем в слоях выше- и нижележащих. Уверенность Гутенберга в существовании слоя пониженных скоростей подкрепляют некоторые другие исследователи.

В 1949 г. Л. Минтроп (Mintrop, 1949) публикует результаты обработки сейсмограмм искусственного взрыва, произведенного 18 апреля 1947 г. на о. Гельголанд. Сопоставление сейсмограмм этого взрыва с сейсмограммами ряда землетрясений позволило ему сделать вывод, что пластический слой на глубине 110–118 км опоясывает всю Землю. Наличие зоны тени подтверждают чешская исследовательница Л. Рупрехтова (Ruprechtová, 1958) и японец И. Кисимото (Kishimoto, 1956). Отчет экспертов по ядерным взрывам в 1958 г. также указал на существование зоны тени и при искусственных взрывах, что совпало с выводами Гутенберга, полученными длинным и трудоемким способом из записей землетрясений.

Наиболее важным подтверждением существования слоя пониженных скоростей считалось в те годы открытие итальянского исследователя П. Калои, обнаружившего каналовые волны (Caloi, 1953, 1954). В 1953 г. об этом же, независимо от него, сообщили американцы Ф. Пресс и М. Юинг. Но трактовка обнаруженных волн у этих авторов иная – они предлагают для объяснения распространения каналовых волн механизм, подобный "шепчущей галерее", т.е. распространение волн путем многократных скользящих отражений от границы Мохоровичича. Гутенберг это объяснение отвергает, считая, что "волны, приходящие от очагов с глубины больше 60 км, уже не скользят вдоль границы Мохоровичича, а суммарная энергия волн должна существенно уменьшаться при каждом отражении от этой границы" ("Верхняя мантия Земли", 1964, стр. 74).

Сам Гутенберг также обнаруживает каналовые волны по записям землетрясения 1952 г. в Керн-Каунти (Калифорния). Проанализировав по сейсмограммам этого землетрясения и по записям других землетрясений в Южной Калифорнии времена пробега и амплитуды волн, приходящих с глубин, на которых должен быть расположен астеносферный канал, он показывает, что результаты опять-таки свидетельствуют о наличии этого слоя, который, "вероятно, в большей степени обусловлен влиянием возрастания температуры с глубиной, чем увеличением давления на глубине, где достигается точка плавления вещества, в то время как выше и ниже канала превалирует эффект роста с глубиной давления" ("Верхняя мантия Земли", 1964, стр. 75).

Многолетние исследования Гутенберга – это титанический труд по домашнему перебору различных методов: привлечение амплитудных кривых предельных волн, оценка изменения размеров и конфигурации зоны тени в зависимости от глубины очага, вычисление скоростей в точках перегиба годографов от землетрясений, возникающих на разных глубинах, вычисление разностей времен вступления прямых и отраженных от подошвы коры продольных волн, изучение каналовых и поверхностных волн.

В итоге этой огромной работы Гутенберг пришел к заключению, что для выяснения строения мантии необходимо вычислять средние для всей Земли скорости сейсмических волн на разных глубинах. Полученные в результате представления, сложившиеся к 1953–1954 гг., он резюмировал следующим образом: "от границы Мохоровичича до 200 км скорости меняются незначительно, имея, однако, на этих глубинах минимум; от 200 до 950 км – относительно быстро и довольно регулярно возрастают; от 950 до 2700 км возрастают слабее и менее регулярно, причем на глубине 900–1000 км их возрастание относительно мало" ("Верхняя мантия Земли", 1964, стр. 88).

Однако интерпретация Гутенберга шла вразрез с общепринятыми взглядами, что скорости сейсмических волн возрастают с глубиной вплоть до ядра. Поколебать эти взгляды было сложно из-за очевидной трудности интерпретации сейсмограмм, ибо на больших эпицентральных расстояниях сейсмограф записывает разные типы сейсмических волн, поэтому запись весьма трудно расшифровать, а сигналы идентифицировать. Кроме того, трудность четкого выделения астеносферного канала связана как с неоднородностью самого канала, так и с особенностями распространения сейсмических волн (дифракция, рассеяние, проникание и т.д.) (Андерсон, 1964; Лукк, 1965, и др.).

В результате не только свидетельство С. Мохоровичича и довольно обоснованная гипотеза Голицына, но даже веские доказательства Гутенберга в пользу

существования астеносферы игнорировались большинством авторитетных ученых в течение 30 лет. В лучшем случае к данным Гутенберга относились как к сомнительным.

Наиболее серьезным сторонником противоположных взглядов, как мы уже говорили, был Г. Джеффрис. Хотя Джеффрис и не отрицал, что трактовка 20<sup>0</sup>-й границы, предложенная Гутенбергом, теоретически вполне возможна (Jeffreys, 1957), объяснял эту границу он совсем иначе. Он считал, что если в каком-то слое скорость сейсмических волн увеличивается резко — значительно резче, чем в выше- и нижележащих слоях, то теоретически возможны две ситуации: либо это разрыв, либо изменение кривизны годографа. Сопоставляя эти возможности с экспериментальными данными, Джеффрис пришел к выводу, что однозначного выбора делать нельзя и оба предположения неудовлетворительны. В конце концов он разработал промежуточную гипотезу, согласно которой скорость изменяется непрерывно, но на определенном интервале достаточно быстро, чтобы возбудить на соответствующих эпицентральных расстояниях три волны *P* (прошедшую выше "особого слоя", отраженную от него и преломленную в нем, а затем отраженную от его нижней границы и вышедшую опять вверх). В 1952 г., обобщив сейсмические данные о 20<sup>0</sup>-й границе (400 км), он пришел к выводу, что если эта граница резкая, то ее глубина — 500 км. Он не исключал, что между 400 и 650 км есть слой быстрого изменения скоростей распространения продольных волн (Jeffreys, 1952). К этим цифрам следует еще добавить мощность верхнего слоя, т.е. коры, которую он считал равной 32–33 км.

Что касается малых амплитуд, обнаруженных Гутенбергом, то Джеффрис считал возможным объяснить их не только изменением скоростей сейсмических волн, но и возможными особенностями усиливающей аппаратуры и ориентировки приборов, воспринимающих сейсмические сигналы.

Поэтому, по мнению Джеффриса, нет оснований пересматривать сложившиеся представления, согласно которым скорости сейсмических волн неуклонно увеличиваются с глубиной. Уточнять же скоростной разрез следует методом Вихерта. Но прежде чем воспользоваться методом Вихерта для определения глубинного строения Земли, надо быть уверенным в репрезентативности данных.

Так как представления о строении мантии в 20–50-е годы строились уже не на данных отдельных станций, а на основе таблиц времен пробега, обобщающих данные сети станций, то годографы в этот период значительно улучшаются. В этом смысле особенно существенным оказался вклад Джеффриса. Последовательное применение строго научных методов и статистический подход к обобщению данных привели его к тому, что в дальнейшем результаты сейсмических исследований характеризовались высокой точностью. Джеффрис проанализировал стандартные годографы. Как показал англичанин Г. Тернер (Turner, 1926), первый стандартный годограф, которым сейсмологи пользовались вплоть до 1929 г., — годограф Цёппритца — содержал значительные погрешности. Его исправление и сопоставление уже нового годографа Цёппритца-Тернера с исследованиями П. Байерли, Дж. Макелвейна и А. Мохоровичича (Byerly, 1926; Macelewan, 1923; Mohorovičić, 1922) дало возможность Джеффрису ввести новые поправки (Jeffreys, 1931). Исправленные таблицы были проинтерполированы и опубликованы в 1932 г. Британской ассоциацией. Но и они не удовлетворили Джеффриса. Поэтому Джеффрис собрал огромное количество данных, относящихся ко всему земному шару: сопоставил сейсмограммы 500 станций за много лет, отобрал наиболее детально записанные землетрясения, точно определил координаты их эпицентров, а затем уже изучил и проинтерпретировал сейсмограммы именно этих землетрясений. Он сравнивал получающиеся для них решения с новыми таблицами и вновь произвел классификацию невязок, вычисляя новые поправки. При этом он разработал методы выяснения и учета различных погрешностей при проводимых расчетах.

Это обширное исследование, начиная с 1931 г., Джеффрис проводил совместно с К. Булленом. Результатом явились таблицы времен пробега, опубликованные в 1935 г. Впоследствии в более уточненном виде они были пере-

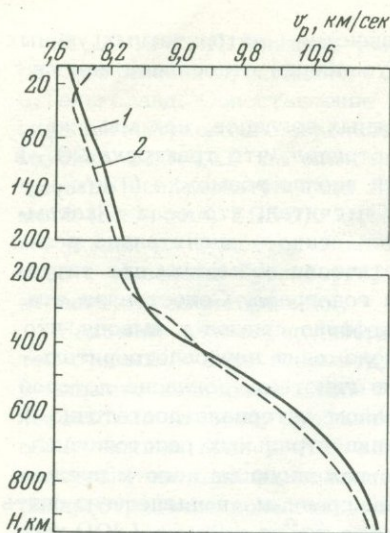


Рис. 4. Скоростные разрезы верхней мантии для стандартных моделей  
1 - Г.Джеффриса (1960); 2 - Б.Гутенберга (Gutenberg, 1959)

изданы в 1940г. (Jeffreys, Bullen, 1940) — знаменитый годограф Джеффриса-Буллена для стандартной модели Земли. Проведя тщательный статистический анализ всех данных, Джеффрис пришел к выводу, что его результаты имеют точность до 0,5%. В 1939 г. на основе полученных им таблиц Джеффрис вычислил скорости продольных и поперечных сейсмических волн внутри Земли. Подавляющее большинство ученых приняли этот скоростной разрез как наиболее надежный результат, средний для Земли в целом.

Итак, при совершенно других методах анализа данных, что у Гутенберга, и при иных взглядах Джеффрис также пришел к выводу о необходимости обобщить данные для всей Земли и по осредненному разрезу судить о строении мантии.

Анализ полученного разреза показал, что Земля делится по вертикали на зоны, отличающиеся характером изменения скоростей ("Физика и химия Земли", 1958, стр. 104). Изучая распределение с глубиной плотности, Буллен назвал эти зоны *A, B, C, D, E, F* и *G* (Bullen, 1940, 1942). Когда выяснилось, что нижняя часть области *D* (2000 км) отлична от остальной, зону разделили на две: *D'* и *D''* (Bullen, 1949). Так практически была выделена верхняя мантия. Впоследствии Гутенберг предложил пересмотреть также границу между областями *B* и *C* (Gutenberg, 1958).

Год от года картина распределения скоростей у Гутенберга и Джеффриса все меньше различалась. Примерно в то же время, что и Джеффрис с Булленом, Гутенберг и Рихтер независимо определили времена пробега главных фаз распределения скоростей (Gutenberg, Richter, 1934, 1935, 1936, 1936<sub>1</sub>, 1937). В целом результаты этих авторов согласуются, и, как писал Джеффрис, им "совместно часто удавалось разобраться в сомнительных местах" (Джеффрис, 1960, стр.129), хотя область волновода они интерпретировали по-прежнему неодинаково.

Итак, работы у Гутенберга, и Джеффриса ясно свидетельствуют о рождении нового подхода к осмыслению сейсмического материала. Осознание неправомерности суждений о строении мантии на основе отдельных скоростных разрезов, построенных по данным одной станции, обусловило обобщение материала по всей Земле, создание стандартных моделей. Однозначная их трактовка влечет за собой попытки выработать единые взгляды на строение мантии, а безуспешность этих попыток приводит к существованию в течение многих лет альтернативных стандартных моделей (с волноводом и без него соответственно) (рис. 4) и к поискам способов усовершенствования их для отдельных регионов.

Примером такого усовершенствования могут служить работы И. Леман, занимавшей промежуточную позицию между представлениями Гутенберга и Джеффриса и построившей скоростные разрезы мантии, отличающиеся наибольшей детальностью (Lehmann, 1934, 1953, 1955). До конца 50-х годов Леман считала, что ниже границы Мохоровичича скорость продольных волн постоянна (8,12 км/сек) вплоть до 20<sup>0</sup>-го разрыва, где она увеличивается скачком (до 8,35-8,40 км/сек), а затем возрастает плавно.

Эти представления почти совпадают со взглядами Джеффриса. Разница заключается в том, что Джеффрис полагает увеличение скорости вниз от самой границы Мохоровичича и 20<sup>0</sup>-й разрыв рассматривает как границу, где скачком растет градиент скорости, а не сама скорость, хотя он и не исключает ее скачка.

Для построения скоростных разрезов мантии Леман разработала в 50-е годы метод, названный ею методом последовательного приближения (или подбора). Сущность его заключалась в том, что мантия разбивалась на слои, в каждом из которых зависимость скорости от расстояния задавалась функцией одного вида, но с неизвестными параметрами. Они изменялись до тех пор, пока получающийся годограф не совпадал достаточно хорошо с экспериментальным. Тем самым определялся разрез. Так она построила скоростной разрез мантии для Европы.

Аналогично интерпретировались годографы в других регионах. Обзор этих исследований дан в работах И. Леман и Д. Л. Андерсона с соавторами (Lehmann, 1955; Anderson et al., 1965). Несколько позже, воспользовавшись этим же методом, Леман привлекла для уточнения скоростного разреза и данные по поверхностным волнам (с помощью М. Лэндисмена и И. Сато).

### 3. ПЕРВЫЕ ДОГАДКИ О НЕОДНОЗНАЧНОСТИ ТРАКТОВКИ СТАНДАРТНОГО РАЗРЕЗА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ МАНТИИ (РАБОТЫ ДЖ. МАКЕЛВЕЙНА, Е. Ф. САВАРЕНСКОГО, Л. Б. СЛИХТЕРА)

Наряду с господствовавшей в 20–50-е годы практикой оценки строения мантии существовали отдельные исследования, в которых содержались догадки о неправомерности однозначной трактовки среднего скоростного разреза. В частности, такое исключение составляли некоторые работы, проведенные в СССР.

Прежде чем остановиться на них, отметим статью, поставившую в общетеоретическом аспекте вопрос о единственности решения обратной задачи сейсмологии. Речь идет об исследовании Л. Б. Сликтера (Slichter, 1932), обобщившего метод Герглотца–Вихтера на годографы с точками перегиба и петлями для случая горизонтально однородной слоистой Земли. Проследивая ход сейсмических лучей в случае, когда в недрах планеты имеется волновод, Сликтер показал, что, вообще говоря, ниже волновода скорости сейсмических волн не зависят от закона их распределения в волноводе. Иными словами, одному и тому же годографу могут соответствовать различные скоростные разрезы (или волноводы с "перетасованными" слоями). Он показал также, что из-за сложности интерпретации в точках нарушения монотонности годографа, несмотря на теоретическую однозначность этой интерпретации, одному и тому же экспериментальному годографу могут соответствовать модели мантии как со слоями пониженных скоростей, так и со слоями резкого нарастания градиентов скоростей. Короче, эта работа теоретически показала неоднозначность "обращения" годографа в скоростной разрез.

Это было теоретическим предвосхищением дальнейшего положения вещей в интерпретации сейсмического материала о мантии.

Вернемся, однако, к исследованиям, непосредственно связанным с выяснением скоростного разреза мантии на конкретном сейсмическом материале. Советские исследователи, особенно Г. А. Гамбурцев, П. М. Никифоров, Е. Ф. Саваренский, внесли серьезный вклад в развитие сейсмических исследований мантии. Достаточно сказать, что предложенный Г. А. Гамбурцевым еще в 1938 г. и детально разработанный к 1949 г. под его руководством метод ГСЗ стал одним из основных при изучении верхов мантии. Но проблемой выяснения строения мантии "вплотную" занимался лишь Е. Ф. Саваренский.

В 1940 г. Саваренский подметил большое расхождение в годографах Байерли (Byerly, 1933), несмотря на тщательность, с которой эти годографы составлялись. Эти расхождения, по его мнению, могут объясняться лишь неоднородностью в строении земного шара до больших глубин, т. е. различным состоянием вещества внутри Земли в разных ее слоях. В то время подобные предположения почти не возникали. Саваренский ссылается на работу Дж. Макелвейна (MacEwan, 1937), название которой он переводит как "Корни гор или

корни континентов?" На основе вычисленных К.Дамом значений скоростей сейсмических волн до глубин 800 км Макелвейн показывает, что и сами скорости, и характер их изменения с глубиной заметно различаются. На этом основании он утверждает, что не только горы, как это следует из теории изоэластики, имеют корни, но и основания континентов простираются на большие глубины. По его мнению, было бы правильнее считать, что континенты влияют на состояние вещества под ними (Саваренский, 1940).

Саваренский сопоставляет данные Витте, построившего методом Вихерта "осредненный" для всей Земли скоростной разрез по годографу Джеффриса (Jeffreys, 1932), с результатами Дама, вычислившего скоростные разрезы по данным калифорнийского и японского землетрясений, а также с результатами Вадати. Различие "индивидуализированных" и обобщенного скоростных разрезов подтверждают догадку Саваренского о неоднородном строении недр. Однако он все еще находит возможным выбирать наиболее "точный" скоростной разрез для всей планеты (он считает таковым разрез Витте), на его основе строить аналитический годограф и затем уже сравнивать его с экспериментальным. Иными словами, несмотря на свои сомнения, в этой работе он придерживался общей для тех лет однозначной оценки стандартной скоростной модели Земли.

Хорошее совпадение этого аналитического годографа с экспериментальным убеждает его, что в среднем до глубины 900 км скорость плавно нарастает с глубиной, т.е. кривая ее изменения гладкая, без перегибов и разрывов. Первой существенной границей в мантии он считал раздел 900 км и, как мы увидим, в дальнейшем разными методами проверяет эти свои представления. Заметим, что это — как раз та глубина, на которой меняются свойства мантии, а граница, лежащая несколько глубже — 900 км, — нижняя граница верхней мантии. Таким образом, Саваренский почти одновременно с Булленом предположил, что 900–1000-километровый подкорковый слой резко отличен от лежащей ниже толщи, хотя, быть может, он и не сформулировал этого столь определенно.

В том же году Саваренский пошел дальше в своих сомнениях относительно правомерности построения единого для всей планеты стандартного годографа (Саваренский, 1940<sub>1</sub>). Он исследовал региональные годографы для различных участков земного шара, привлекая данные о временах пробега продольных волн, опубликованные с 1923 по 1933 г. в Международных сейсмических сводках, и группируя их по указанным районам.

В результате Саваренский построил три годографа и сравнил их с годографом Джеффриса 1932 г. (Jeffreys, 1932), который он считал стандартным. Соответственно полученные им скоростные распределения он сравнил со средним для всей Земли скоростным распределением, вычисленным Витте (по этому же годографу Джеффриса).

Результаты этого сравнения иллюстрируют подобие в ходе кривых. Очень интересно, что всюду на кривых есть максимумы и минимумы. Любопытно, что намечаемые по этим экстремумам границы погружаются в сторону Американского континента. Кроме этих границ, Саваренский выделяет в мантии еще менее четкие разделы, связанные с изменением знака ускорения. Они как бы очерчивают слой, утолщающийся в сторону Америки.

Эта работа и явилась, по нашему мнению, удивительным исключением в смысле трактовки экспериментальных данных. Тенденция составлять осредненный для всей Земли годограф, вычислять затем методом Вихерта стандартный скоростной разрез и по нему судить о строении мантии не была исчерпана даже в конце 60-х годов (см., например, Hergin et al., 1968). Саваренский же уже в 1940 г. не только предположил, но и экспериментально подтвердил, что мантия существенно неоднородна в горизонтальном направлении. Однако эта идея "утвердилась" в умах геофизиков лишь два десятилетия спустя и потому в 40–50-е годы не вызвала изменений в подходе к изучению мантии.

Чтобы удостовериться в справедливости своих взглядов, Саваренский впервые после Голицына (40 лет спустя) обратился для изучения скоростного раз-

реза к непосредственному изучению углов выхода сейсмической радиации. Наиболее обстоятельное его исследование, посвященное углам выхода сейсмической радиации, было опубликовано несколько позже (Саваренский, 1952). Однако уже в 1948 г. он оценил влияние расстройки приборов и строения слоев земной коры на измеряемые углы (Саваренский, 1948) и разработал вместе с Д.П. Кирносом практические указания для измерения углов выхода.

Кроме того, он создал дифференциальный метод построения годографа, при котором производная годографа получалась непосредственно из наблюдений (Саваренский, 1948<sub>1</sub>). Используя данные Москвы и Пулковы с 1935 по 1941 г., Саваренский построил своим методом годографы 34 землетрясений с эпицентрными расстояниями от 12 до 64°. На основе этих наблюдений, считая достаточно достоверными сведения для расстояния более 18°, он методом Вихерта выясняет зависимость скорости сейсмических волн для глубин, превосходящих 350 км (Саваренский, 1948).

Оригинальность взглядов Саваренского сказалась не только в "доказательстве" горизонтальных неоднородностей мантии, но и в его представлениях об ее вертикальном строении. В то время как в течение десятилетий (начиная с Цёшпритца, Гейгера, Гутенберга) велись работы по установлению границ второго рода, Саваренский само их существование подвергает сомнению. Он высказывает мнение, что "по физическим соображениям существование гипотетических границ второго рода следует признать маловероятным. Более вероятны постепенные изменения параметров среды, т.е. переходные слои, а не границы" (Саваренский, 1955, стр. 109). Он считал, что амплитудный метод Цёшпритца, на основе которого были выделены границы второго рода, не очень надежен: даже наиболее полные данные о наблюдаемых значениях  $PP:P$ , заимствованные из работы Гутенберга и Рихтера (Gutenberg, Richter, 1934-1936), дают дисперсию, соответствующую пятикратным изменениям этой величины. Эта дисперсия вызвана, по мнению Саваренского, неравномерным излучением очага. Она-то и делает возможным произвольное построение кривой  $PP:P$  и определение несуществующих разрезов.

Итак, в верхней 500-километровой толще планеты скорости сейсмических волн довольно быстро увеличиваются с глубиной. На основе анализа 17 сейсмограмм, записанных среднеазиатскими станциями в 1934-1936 гг., Саваренский утверждал, что существуют отражения от обнаруженной Репетти (Repetti, 1928) границы на глубине, немногим большей 900 км (Саваренский, 1941). Ниже 900-1000 км наблюдается резкое уменьшение роста скорости с глубиной; на несколько меньшей глубине лежат очаги наиболее глубоких землетрясений.

Хотя описанное увеличение скоростей сейсмических волн и непрерывно, но оно неравномерно: градиент скоростей выше как у продольных, так и у поперечных волн в слое  $C$ , лежащем между 400 и 600 км глубины. Это может приводить к квазиотражениям ("петлевой" зависимости скорости от глубины), т.е. к эффекту, который интерпретируется как проявление 20°-й границы. Впрочем, сам автор объясняет ее иначе - уплотнением, почти фокусировкой сейсмических лучей в слое  $C$  из-за роста там скоростей сейсмических волн (Саваренский, 1955, стр. 112).

## ВЫВОДЫ

Рассматриваемый период можно назвать классическим в развитии сейсмических исследований мантии. В эти годы совершенствуется аппаратура и создается сеть сейсмических станций, способная собирать материал, дающий представление о строении Земли в целом. Совершенствуются старые и разрабатываются новые методы наблюдения и интерпретации экспериментальных сейсмических материалов. Происходит значительное накопление материалов наблюдений, их классификация. В результате возникает неоднозначность трактовки годографов при выяснении строения мантии.

Анализ работ, связанных с попыткой преодолеть неопределенность, возникшую при интерпретации сейсмического материала в 20-50-е годы нашего века, показывает очень интересную закономерность.

Внешние пути преодоления этой неопределенности были различными: у Гуттенберга – домашний перебор разных методов оценки внутреннего строения мантии (привлечение амплитудных кривых продольных волн, оценка изменения размеров и конфигурации зоны тени при "погружении" источника колебаний, вычисление скоростей в точках перегиба годографов от землетрясений, возникающих на разных глубинах, вычисление разностей времен пробега прямых и отраженных продольных волн, изучение каналовых и поверхностных волн); у Джеффриса – последовательное применение строгих научных методов и статистического подхода к отбору и обобщению экспериментального материала по всему миру; у Леман – создание методов перебора скоростных моделей и ручная их реализация с использованием данных объемных, а затем и поверхностных волн.

Результаты же, несмотря на различия в представлениях о мантии, вскрыли принципиальную близость всех этих попыток. Устраняя тем или иным методом неоднозначность трактовки отдельных годографов, все авторы пришли к пониманию того, что необходимо строить осредненную для всей планеты скоростную модель мантии. И если отдельные годографы и соответственно скоростные модели, по их мнению, могут быть неточны из-за возможных ошибок, то интегральные, осредненные для Земли, скоростные модели они оценивают как наилучшее приближение к истине.

Сознавая возможность локальных колебаний в строении мантии, сейсмологи, однако (за исключением Макелвейна и Саваренского), не считают их столь значительными, чтобы высказывать предположения о коренном отличии мантии в том или ином районе от осредненной модели. Например, высоко оценивая точность своих таблиц, Джеффрис пишет: "Это не значит, что все наблюдения должны совпасть с таблицами с указанной точностью. Но можно утверждать, что, допустив в таблице любое большее изменение, мы, может быть, и получим лучшее согласие с некоторыми данными, но, наверняка, будет худшее согласие с рядом других данных" (Джеффрис, 1960, стр. 149).

Однозначность оценки осредненного для всей планеты годографа приводит к параллельному существованию двух альтернативных моделей. Фактически, оценивая конкретный материал в том или ином районе, каждый автор создает свою модель для этого района, улучшая одну из конкурирующих стандартных моделей методом подбора, методом проб и ошибок, как это сделала для Европы И.Леман. Иными словами, однозначная оценка отдельных разрезов заменяется однозначной трактовкой стандартных разрезов мантии, хотя появляются первые подтверждения ее горизонтальных неоднородностей.

### ГЛАВА III

## ИНФОРМАЦИОННЫЙ ВЗРЫВ В СЕЙСМОЛОГИИ. ОСОЗНАНИЯ ВЕРОЯТНОСТНОГО ХАРАКТЕРА ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О МАНТИИ (С 1957 Г.)

### 1. СОЗДАНИЕ ПРЕДПОСЫЛОК ДЕТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ МАНТИИ В МЕЖДУНАРОДНОМ МАСШТАБЕ (ИДЕИ В. В. БЕЛОУСОВА)

1 июля 1957 г. началось проведение в жизнь небывалого по размаху научного мероприятия – Международного геофизического года (МГГ), продолжавшегося до 31 декабря 1959 г.

В области сейсмологии МГГ не ставил своей целью изучение мантии, планировалось лишь исследование сейсмичности труднодоступных и малоизученных районов, наблюдение микросейсм, выяснение строения коры (Повзнер, 1966, стр. 102). Однако именно с МГГ мы датируем начало нового периода в развитии научного подхода к изучению мантии, так как в это время создаются предпосылки для проведения современных исследований в этой области. МГГ можно охарактеризовать как этап, подготовивший возможности осуществления в международном масштабе детального изучения мантии.

В частности, к итогам МГГ в СССР в области сейсмологии можно отнести завершение строительства и переоснащения единой сети сейсмических станций, создание в институтах сильных коллективов ученых (Повзнер, 1966).

Основные же работы, связанные с выяснением строения верхней мантии, развернулись во время осуществления проекта "Верхняя мантия и ее влияние на развитие земной коры". Этот проект предложил в 1960 г. на XII Генеральной ассамблее МГГС в Хельсинки член-корр. АН СССР В.В. Белоусов.

Выдвигая проект широких международных исследований мантии методами геологии, геофизики и геохимии, В.В. Белоусов исходил из разработанной им концепции о "позтажном" выплавлении и дифференциации вещества коры и мантии, о возникающей в результате инверсии плотностей и ее выравнивании и о происходящих при этом пульсациях земной коры, ее колебательных движениях и движениях, вызывающих возникновение и развитие материков и океанов<sup>1</sup>. Вытекающая из этой концепции идея, что именно в результате вертикальных движений, происходящих в верхней мантии, в земной коре образуются поднятия, опускания, расколы, смятия в складки, а также что эти движения являются источником вулканических извержений (Белоусов, 1961, стр. 21), впоследствии была подтверждена самыми различными исследованиями.

В данной работе не представляется возможным дать их обзор, поэтому приведем лишь несколько примеров. Такими примерами могут служить обоснование механизма вертикальной передачи движений от мантии к коре<sup>2</sup>, изу-

<sup>1</sup> См. В.В. Белоусов. Внутреннее строение и развитие Земли в свете геотектонических данных. – Труды Геофиз. ин-та АН СССР, 1955, № 26 (153); В.В. Белоусов. Развитие земного шара и тектогенез. – Сов. геол., 1960, № 7; В.В. Белоусов. Основные вопросы геотектоники. М., Госгеолтехиздат, 1962; и др.

<sup>2</sup> В.В. Артюшков. Слой пониженной вязкости в верхней мантии и связанные с ним явления. Докт. дисс. М., 1969.

чение установления вертикального характера процессов, протекающих в глубинных разломах, возникающих в мантии и разрывающих всю кору (Субботин, Наумчик, Рахимова, 1968); обнаружение приуроченности очагов землетрясений в зоне Бенюффа к глубинам до 600 км ("Верхняя мантия Земли", 1964); открытие карманов магмы под очагами вулканов на глубинах 80–100 км (Горшков, 1958); доказательство того, что кора переходных зон есть выброшенное вулканами и метаморфизованное вещество мантии<sup>1</sup>, что "базальтовый" и "гранитный" слои коры – продукты дифференциации вещества мантии, в частности, алмазоносные трубки формируются на глубинах порядка 120–200 км<sup>2</sup>, установление неразрывности коро–мантийных блоков и, следовательно, вертикального характера протекающих в них процессов как в глобальном масштабе<sup>3</sup>, так и в региональном (Саг et al., 1973) и многие другие.

В области сейсмологии эти идеи оказались весьма существенными потому, что дали толчок широкому фронту работ по изучению мантии. "Проект верхней мантии" был встречен с энтузиазмом, в нем приняли участие ученые около 50 стран. Когда же срок проекта официально закончился (к 1970 г.), то было решено продолжать исследования в рамках "Геодинамического проекта" (с 1972 г.). Эти годы характеризуются резким увеличением количества и качества информации о мантии. Стало совершенно очевидным, что прежние "стандартные" модели не объясняют всего потока фактов. Возникла та самая стена противоречий, которая, по словам Альберта Эйнштейна и Леопольда Инфельда, часто преграждает дорогу научному прогрессу и создает драматический конфликт между реальностью и нашими попытками ее понять<sup>4</sup>.

В современных попытках разрешить эти противоречия возникают принципиально новые идеи, новый подход к фактам и к оценке результатов, к выбору методов решения стоящих перед наукой задач.

Попробуем проследить те конкретные формы, в которых этот процесс протекал при сейсмических исследованиях мантии.

## 2. ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НОВЫХ НАУЧНЫХ ПОДХОДОВ

Основные факторы, послужившие причиной резкого увеличения количества данных о мантии, – расширение сети сейсмических станций, их группирование; модернизация и стандартизация аппаратуры, развитие сейсмологии взрывов. Помимо роста количества данных, увеличивается возможность извлекать больше сведений из того же самого экспериментального материала. Это связано с тем, что наряду с кинематическими изучаются динамические характеристики волн, при изучении мантии, помимо объемных, используются поверхностные волны и собственные колебания Земли, развивается моделирование, изучается затухание сейсмических волн и др.

Остановимся кратко на этих тенденциях развития сейсмологии.

### 1. Рост мировой сейсмической сети

В 40–50-е годы мировая сеть сейсмических станций уже дала возможность изучать свойства мантии для планеты в целом, однако распределение станций не отличалось равномерностью. Почти не работали станции на океанах,

<sup>1</sup>Е.К. Мархинин. Вулканизм Курильских островов (его роль в выносе вещества из мантии и в формировании коры). Автореф. докт. дисс. М., 1966.

<sup>2</sup>Б.Г. Лутц. Реакции и ступени глубинного метаморфизма. Автореферат докт. дисс. М., 1970.

<sup>3</sup>А.П. Тарков. Глубинное строение основных планетарных структур по геофизическим данным. Воронеж, 1970.

<sup>4</sup>А.Эйнштейн, Л.Инфельд. Эволюция физики. – М.–Л., ОГИЗ, 1948, стр. 237–238.

в Арктике и Антарктике. По данным этой сети иногда невозможно было получить представление о строении мантии в том или ином регионе.

Поэтому ряд сейсмологов (Б.Гутенберг, П.Калои, Е.А. Розова) изучали большие регионы на основе записей землетрясений не всей мировой сетью, а более ограниченными региональными сетями. Возможности этих сетей увеличивались из года в год, но и они не всегда удовлетворяли исследователей.

Резкое повышение интереса к недрам нашей планеты привело к тому, что годы после МГГ характеризуются быстрым развитием сейсмических сетей отдельных стран.

Например, береговой и геодезической службой США было сооружено в этот период свыше 100 стандартных станций. Чувствительность установленных на них приборов ограничивали лишь помехи от микросейсм (Ритсема, 1972). Аналогичная сеть из 20 станций создана в Канаде. С 1956 по 1958 г. в Китае было открыто более 20 сейсмических станций, из которых две (под Пекином и Ланьчжоу) — центральные (Саваренский, 1958).

Наблюдается тенденция объединения сейсмических сетей, рост координации их деятельности. 19–21 марта 1959 г. Совет по сейсмологии принял решение о создании Единой сейсмической службы СССР (ЕСС) с единообразной аппаратурой, единой методикой наблюдений и обработки результатов. Было решено выделить сеть опорных станций, стандартизованных для изучения удаленных землетрясений начиная с определенного энергетического уровня интенсивности, а более слабые землетрясения, кроме того, регистрировать временными и постоянными высокочувствительными станциями, сосредоточенными в наиболее сейсмоактивных районах (Соловьев, 1959). Первый вариант опорной сети СССР был организован в 1965 г., к 1966 г. число опорных станций достигло 50. Было установлено также несколько местных сетей с высокочувствительной аппаратурой для детального изучения отдельных сейсмических районов. Сооружены станции для регистрации удаленных толчков в окраинных районах страны и в Антарктиде, так что мировая сейсмическая сеть стала равномернее (Ритсема, 1972).

В 1967 г. в Советском Союзе действовало более 100 сейсмических станций (Саваренский, 1967). Опорная сеть вместе с региональными составила Единую систему сейсмических наблюдений СССР (ЕССН). Н.В. Кондорская и З.И. Аранович разработали основные принципы оптимизации этой системы. Организована также Единая стандартизованная сейсмологическая служба США.

Помимо единых сетей в отдельных странах, сформировалась мировая сейсмическая сеть. К 1964 г. на Земле работало 1139 станций. Так как они были распределены недостаточно равномерно и оборудованы разной аппаратурой, то в 1964 г. наметилось дальнейшее расширение этой сети и оборудование ее более точными и стандартными приборами. Причем Международный сейсмологический центр планировал дальнейшее увеличение числа станций с таким расчетом, чтобы они были расположены во всех районах суши не реже чем через 1000 км друг от друга, а при специальных исследованиях — гораздо чаще (Буллен, 1966). В результате проведенных преобразований Мировая стандартная сейсмологическая сеть насчитывала в 1971 г. 1620 станций.

## 2. Группирование станций

Помимо увеличения числа станций стало широко применяться и их группирование, что чрезвычайно повысило разрешающую способность сейсмологии.

Примером такого группирования может служить сеть станций США, работавших по проекту VELA—Uniform. В вычислительном центре Эдинбургского университета (Шотландия) на магнитных лентах хранятся записи систем группирования, организованных Институтом геологических наук этого университета в Великобритании, Бразилии, Иране, Турции. Сюда по запросу поступают сведения из Лаборатории атомных исследований в Блекнесте (Англия), где

собираются данные станций группирования Великобритании, Канады, Австралии, Индии, Швеции (Кондорская, 1971). Группы станций используются в большом количестве исследований для определения "мантийных" скоростей (Anderson, et al., 1966; Bag et al., 1963; Niazi, Anderson, 1965; и др.). Из советских исследований можно назвать работы по изучению глубинного строения зоны перехода от Азиатского континента к Тихому океану, по выяснению глубинного строения Памиро-Гиндукушской зоны, по оконтуриванию области пониженных скоростей в мантии Байкальской рифтовой зоны.

Создаются профильные и площадные системы и из временных высокочувствительных станций. Увеличение периода наблюдений позволяет дожидаться сильного землетрясения, колебания от которого четко регистрируются на больших удалениях. Поэтому профильные системы наблюдений (ПСН) могут достигать несколько тысяч километров и фиксировать волны, проходящие сквозь всю верхнюю мантию. Примером может служить профиль Памир-Байкал (длинной 3000 км), на котором станции регистрировали землетрясения более 10 лет, давая возможность изучать Памиро-Гиндукушскую зону в проходящих лучах (Нерсесов, Раутиан, 1964; Бутовская, Уломов, 1962).

При наиболее детальных сейсмологических наблюдениях профильные системы располагаются между эпицентрными зонами, что позволяет создавать корреляционно увязанные системы встречных и нагоняющих годографов отраженных и преломленных (рефрагированных) глубинных волн (Бунэ и др., 1960; Нерсесов, Раутиан, 1964, и др.). Аналогичные профили создают при ГСЗ.

При менее детальных площадных и профильных наблюдениях получаемые материалы позволяют строить сводные годографы для отдельных регионов, дающие представление о внутреннем строении этих регионов (Бутовская, Уломов, 1962; Азбель, Кондорская, 1974).

В эпицентральных зонах проводятся исследования с использованием записей прямых волн от определенных по глубине источников (Федотов, 1963<sub>1</sub>; Федоров и др., 1963, 1964; Лукк, Нерсесов, 1965; Лукк и др., 1970; Тараканов, Левый, 1967, 1969; Бунэ и др., 1960; и др.). Методика аналогична сейморазведочному торпедированию. Физическая суть этой методики заключается в том, что возможность "перебора" очагов позволяет проследить за изменением с глубиной всего волнового поля.

Располагая полной волновой картиной от очагов на разных глубинах, исследователи получают возможность следить за поведением всевозможных вторичных волн (обменных, отраженных), обусловленных резкими изменениями упругих характеристик на ряде поверхностей раздела внутри верхней мантии. Это весьма существенно для выяснения особенностей строения мантии. Например, годограф Л. Лукка, построенный таким образом, весьма отличается от годографа Джеффриса-Буллена. Если последние создают по существу интегральный годограф первых вступлений, то Лукк, анализирующий и последующие вступления, выделяет две достаточно протяженные петли. Пропуск же столь протяженных петель годографа при расчетах скоростного разреза ведет к его существенным искажениям, исключает из рассмотрения характерные детали глубинного строения Земли (Лукк, 1965; Магницкий, 1965).

Другим примером резкого увеличения "разрешающей способности" сейсмологии при группировании станций и последующей цифровой обработке записей может служить выделение последующих вступлений на записях сейсмической группы в Канаде, свидетельствующих о наличии в мантии границ на глубинах 130-170 и 650 км (Gutowski, Kanasewich, 1974).

Профильные наблюдения дали возможность фиксировать обменные волны от удаленных землетрясений. Метод обменных волн от землетрясений (МОВЗ) для изучения мантии в СССР применяли Н.К. Булин, Ю.П. Сытин, И.В. Померанцева и др. (Булин, 1963, 1965, 1967, 1967<sub>1</sub>; Булин, Сытин, 1960; Булин и др., 1974; Померанцева, 1968; Померанцева, Мозженко и др., 1965; Халевин и др., 1968; Щербакова и др., 1969, и др.). Результаты этих работ изложены нами при описании современных представлений о строении мантии.

### 3. Совершенствование и стандартизация аппаратуры

Еще в начале нашего века Международная сейсмическая ассоциация прилагала усилия, чтобы осуществить стандартизацию аппаратуры, и способствовала обмену опытом между странами (Коридалин, 1966<sub>1</sub>), но особенно остро эта проблема встала в 60-е годы.

На международных совещаниях Консультативного комитета ЮНЕСКО (1955), Европейской сейсмологической комиссии (ЕСК) (1962) и Ассоциации сейсмологии и физики недр Земли (1964) были приняты конкретные решения об оптимальных параметрах аппаратуры, а также рекомендованы основные типы приборов, отвечающие этим параметрам (Кирнос, Беньюфф, Пресс-Юинг). Эти приборы стали почти сразу же внедряться в практику. Так, в СССР построено несколько десятков экземпляров типовой аппаратуры для станций Чехословакии, Монголии, Кубы, Польши, КНР, ДРВ, Румынии, Венгрии, ГДР, Болгарии, Югославии и других стран. По заказу Международного сейсмологического института (Токио) в Японию направлено три разных комплекса типовой сейсмической аппаратуры. Проведен обмен приборами с США: на сейсмической станции Ламонтской геологической обсерватории Колумбийского университета работают комплексы сейсмографов системы Кирнос, а в Центральной геофизической обсерватории Института физики Земли АН СССР в Обнинске — сейсмографы системы Беньюфф и Пресс-Юинг.

Для дальнейшего совершенствования сейсмической аппаратуры и использования международного опыта проводятся новые инструментальные разработки на основе кооперации нескольких стран по линии СЭВ. Научными учреждениями СССР, Польши, ГДР и Чехословакии разработан новый тип сейсмической аппаратуры для регистрации длиннопериодных волн и установка точной службы времени с использованием кварцевых часов и автоматических устройств, подающих марки времени непосредственно на сейсмограмму. Два симпозиума (в СССР — в 1964 г. и в Израиле — в 1965 г.) сыграли большую роль в развитии и применении ЭВМ в практике интерпретации, а совещания в Йене (ГДР) в 1965 и в 1968 гг. — в стандартизации аппаратуры и обработки наблюдений (Коридалин, 1966<sub>1</sub>).

Разработка приборов ведется в СССР, США, Польше, Канаде, Японии и других странах по разным направлениям. Не имея возможности останавливаться на истории развития и совершенствования сейсмической аппаратуры и даже на развитии современного приборостроения для сейсмологии (обзоры можно найти, например, в работах: Борисевич, Кирнос, Харин, 1967; Вольвовский, Вольвовский, 1975; Коридалин, 1964), отметим лишь некоторые из основных тенденций в этой области.

Одно из самых радикальных усовершенствований современных сейсмографов заключается в том, что "вместо традиционной записи на фотобумаге или пленке с динамическим диапазоном 40 дБ все шире применяется запись на магнитной ленте, позволяющая увеличить динамический диапазон одного приемника до 120 дБ" (Ритсема, 1972). Еще в 1969 г. Дж. Берри (Канада) писал: "Относительно аппаратуры трудностей, можно сказать, больше не существует. В настоящее время представилась возможность осуществлять регистрацию в необходимом динамическом диапазоне по всему частотному спектру либо любой его части, интересующей сейсмологов. Более того, большинство полевых партий применяет регистрацию на магнитную ленту, позволяющую использовать существующие сложные методы различной фильтрации" (Берри, 1969).

Запись сейсмических колебаний на магнитную ленту ведется в двоичном коде с возможностью прямого ввода ее в ЭВМ (примером может служить аппаратура, описанная в статье "Станция КОД, 1964"). Однако не все станции записывают колебания цифровым способом, довольно широко используется запись в аналоговой форме. Поэтому внедряется аналоговая аппаратура (например, созданная советскими учеными — Меламуд и др., 1959). Она применима для записей с много- и одноканальной аппаратурой, очень широкополос-

на, позволяет при воспроизведении применять любую частотную фильтрацию. Чтобы обрабатывать такие записи, создана установка измерения ординат через заданные интервалы времени, автоматической их регистрации в виде десятичных цифр и одновременной набивки на перфокарты для ввода в оперативное запоминающее устройство вычислительной машины. При этом скорость обработки данных увеличилась в 100 раз (Колесников, Соловьев, 1964). Разработан прибор для построения графиков с перфокарт (Колесников, Соловьев, 1966).

Конструируются автоматические и полуавтоматические установки для размещения приборов в труднодоступных районах. Примером может служить удобная и надежная в эксплуатации автоматическая станция с использованием, помимо записи на магнитной ленте, микрофотозаписи (Шнирман, 1964).

В течение последних нескольких лет наблюдалась тенденция к отказу от использования длинных расстановок сейсмоприемников и переходу к более простым и менее громоздким трехкомпонентным системам. В отличие от смонтированных на грузовике, такие узлы почти переносного типа. Это очень важно для некоторых полевых партий, работающих в районах, куда можно добраться лишь самолетами, оборудованными поплавками (Берри, 1969).

Помимо перехода от осциллографической записи к магнитной и повышения эффективной чувствительности аппаратуры в результате применения групп приемников и машинных способов очищения записей от помех, все сильнее проявляется тенденция к стандартизации приборов и методики наблюдений. Например, тридцать институтов ФРГ решили применять единую аппаратуру — трехканальный портативный регистратор с магнитной записью, — а ЕСК создала специальную группу для разработки единой методики интерпретации и последующей пересенки всех имеющихся данных (Клосс, 1972).

Чрезвычайно растет точность службы времени. В частности, к 1966 г. в СССР изготовлены высокочувствительные кварцевые часы, обеспечивающие точность хода до  $10^{-7}$  в сутки, что в 100 раз увеличило точность регистрации времени на опорных станциях, а в Чехословакии — установки точного времени со стабильностью подаваемых сигналов  $5 \cdot 10^{-9}$  в сутки ("Аппаратура и методика", 1968).

Разработана аппаратура для дна океана. Так, с 1965 г. на станции Ламонт обрабатываются записи сейсмографа, расположенного на глубине 4 км, в 160 км от побережья Калифорнии (регистрирующая аппаратура на суше). Создана аппаратура для регистрации колебаний в океане с вмонтированным магнитофоном.

#### 4. Развитие сейсмологии взрывов

Наряду с ростом числа станций, регистрирующих волны от землетрясений, широко распространилась регистрация волн, возбуждаемых искусственно. Использование искусственных источников позволяет располагать профили где угодно, независимо от эпицентральных зон, создавать сколь угодно полную систему наблюдений, достаточную для построения разрезов, детальность которых ограничивается лишь разрешающей способностью метода. Влияние ошибок в определении времени и места возникновения колебаний практически сведено к нулю.

На Западе, и особенно в США, разработан комплекс исследований, связанных с регистрацией волн от больших промышленных (химических и ядерных) взрывов; с их помощью изучают мантию вплоть до ядра.

Первые работы по регистрации взрывов проведены в Северной Америке в 1930–1936 гг. для выяснения мощности коры. Систематическое исследование взрывов в целях сейсмологии началось с 1947 г., тогда же была разработана чувствительная аппаратура и решен ряд методических вопросов. Исследования верхней мантии развернулись в США и Канаде после МТГ, особенно в связи с проведением в жизнь программ VELA и "Верхняя мантия" (1960–1971 гг.). Работы велись в рамках многолетних программ и проектов (Хили, 1969; Хили, Уоррен, 1972), наиболее важные из которых:

1) ТГС – трансконтинентальная геофизическая съемка (изучение строения коры и мантии между 35 и 39° с.ш.);

2) сейсмические эксперименты на оз. Верхнем – регистрация волн от 38 5-тонных взрывов более чем на 10 радиально расходящихся профилях по 2000–3000 км длиной;

3) использование волн от ядерных взрывов (производимых на испытательном полигоне в штате Невада) для изучения верхней мантии центральных и западных районов США;

4) изучение верхней мантии в Аризоне с помощью большой сейсмологической группы LASA;

5) детальное изучение верхней мантии вдоль Восточного побережья США в 1965 г. (эксперимент "ЕСООЕ").

В результате изучено строение верхней мантии в США и прилегающих районах Канады. Обзоры этих исследований можно найти в ряде работ (James, Steinhart, 1966; Steinhart, 1967; McConnel et al., 1966; Pakiser, Zietz, 1965; Хили, Уоррен, 1972).

В Канаде глубинные исследования начаты в 1938 г. регистрацией промышленного взрыва в районе оз. Киркленд. С 1953 г. ведутся планомерные работы на современном уровне по изучению строения коры и верхней мантии, координированные с аналогичными работами в США.

С 1963 г. канадские сейсмологи приняли участие в экспериментах крупного масштаба, проводимых на оз. Верхнем. Вслед за успешным завершением этих работ были выполнены два площадных исследования крупного масштаба: в Гудзоновом заливе в 1966 г. и в районе Йелоунайф в 1967 г. В 1968 г. было выполнено исследование границы между провинциями Сьюперитор и Гренвилл, в северо-восточном Квебеке (Берри, 1969).

В Западной и Центральной Европе первые опыты по регистрации горных взрывов осуществлены в Германии под руководством Вихерта в 1926–1929 гг. В дальнейшем такие работы были возобновлены уже после войны. В первые 10–15 лет после войны редкой сетью сейсмических станций регистрировались крупные промышленные и другие взрывы. Среди них можно отметить работу по регистрации взрыва на о. Гельголанд в 1947 г. (Mintrop, 1949).

Широкое развитие получили сейсмические исследования в странах Западной Европы (и в первую очередь, в ФРГ, Франции, Италии и Скандинавских странах) с 1958–1960 гг. Эти работы почти всегда координируются, их ведут несколько стран по единой и многолетней программе. Например, с 1956 по 1967 г. сейсмические исследования, основанные на записях объемных и поверхностных волн в Альпах, совместно вели Австрия, Англия, Италия, Монако, Франция, ФРГ, Швеция (более 50 научных институтов и фирм) (Morelli, 1968).

Из стран Азии наибольший объем сейсмических наблюдений выполнен в Японии. Исследования методом взрывной сейсмологии здесь начаты с 1950 г. (в основном в пределах о. Хонсю и на акваториях окружающих морей). Результаты этих работ приведены и в советских обзорах (Беляевский, Рябой, 1969; Туезов, Жильцов, 1972; Рябой, Старобинец, 1974).

В Индии сравнительно часты подземные толчки, так как с севера и юга к полуострову Индостан примыкают сейсмоактивные территории. Кроме того, для изучения глубинного строения полуострова используются ядерные взрывы, проводимые за пределами его территории (Warma, 1970; Kaila et al., 1970). Эти данные записывают более 20 действующих станций (Kaila et al., 1970).

Первые сведения о глубинном строении Австралии получены в 1956 г. при регистрации ядерных взрывов (Рихтер, 1963). Они касались лишь глубин границы Мохо. Представление же о глубинном строении мантии стало вырисовываться в 1969–1971 гг. (в результате исследований ядерных и химических взрывов, а также записей землетрясений).

Первые сейсмические исследования, касающиеся изучения строения мантии в Африке, датируются началом 50-х годов (Willmore et al., 1952), а к началу работ по международным проектам здесь уже работало около 20 пос-

тоянных станций (Рихтер, 1963; Gumper, Pomeroу, 1970). В 1969 г. начались исследования в Антарктиде.

В 50–60-е годы в сейсмологии взрывов, как и вообще в сейсмологии, совершенствуется методика наблюдений, модернизируется и стандартизируется аппаратура. Например, для более четкого выделения последующих вступлений при взрывах применялись: группирование и суммирование записей (иногда с помощью ЭВМ); корреляция вдоль расстановки, основанная на анализе кажущихся скоростей (Lewis, Meyer, 1968; McCamy, Meyer, 1964); применение скоростных фильтров при суммировании трасс на крестовой установке в 1963 г. на оз. Верхнем ("Материалы Международного совещания", ... 1969); сокращение расстояний между регистрирующими станциями или взрывами (Хейлз, 1969; Штайн, 1969).

Поскольку зарубежная сейсмология "больших взрывов" выросла из сейсмологии землетрясений, то она восприняла в основном ее методику: резкие точечные наблюдения с большим количеством одновременно наблюдающих сейсмических станций. Иногда используются серии небольших специальных взрывов и системы передвижных станций (например, Льюис, Майер, 1969). Профилирование – в основном точечное или кусочно-непрерывное с редкой системой годографов (одиночных, встречных, иногда нагоняющих). В методическом плане интересно сочетание опорных геотраверзов с площадными наблюдениями в крупных регионах. Так, территория США покрыта равномерной сетью профилей, достаточной для построения довольно обоснованной карты глубин границы Мохо.

В СССР сейсмология взрывов развилась на базе сейсморазведки. Наряду с регистрацией крупных промышленных и специальных взрывов, у нас в стране в основном разрабатывается метод ГСЗ, основанный на корреляционных принципах выделения и прослеживания отраженных и преломленных волн, дающих возможность изучать мантию на континентах до глубин 80–100 км, на океанах до 25 км, т.е. верхи мантии выше зоны астеносферы.

Первый опыт ГСЗ относится к 1939 г. (Гамбурцев, 1960, стр. 273). Начать под руководством Г.А. Гамбурцева работы были продолжены А.С.Алексеевым, П.С. Вейцман, Б.С. и И.С. Вольвовскими, Е.И. Гальпериным, Ю.Н. Годиным, И.П. Косминской, И.В. Литвиненко, И.В. Померанцевой, Н.Н. Пузыревым, В.З. Рябым, В.Б. Соллогубом, Н.И. Халевиным и многими другими.

В ряде работ описаны основные этапы развития ГСЗ (Вейцман и др., 1962; Косминская, 1968; Вольвовский, 1973), рассмотрены методические вопросы, в частности касающиеся исследования верхов мантии с помощью ГСЗ (Вейцман и др., 1962; Вольвовский, 1973; Зверев, 1969, 1970; Косминская, 1966, 1968; Косминская, Беляевский, Вольвовский, 1969; Косминская, Зверев, 1969; Косминская, Пузырев, Алексеев, 1972; Литвиненко, 1968; Непрочнов, 1970; Пузырев, 1960, 1967; Рябой, 1965; Рябой, Старобинец, 1973 и др.).

Совершенствование метода ГСЗ было направлено на повышение детальности. Принципиально она возрастает в 1956 г. в связи с появлением систем непрерывного профилирования (Вейцман и др., 1962). В дальнейшем этим методом осуществляется 90% всех профилей. Его эффективность признают европейские сейсмологи (например, немецкий геофизик Х.Клосс). Ю.В. Ризниченко назвал метод ГСЗ гордостью советской сейсмологии. Обычно пункты взрыва располагаются непосредственно на линии наблюдений, что дает возможность строить встречные и нагоняющие годографы. Это так называемое продольное профилирование. При выделении глубинных аномальных зон пункты взрыва могут располагаться в стороне от линии профиля – непродольное профилирование.

В труднодоступных районах со сложным рельефом наблюдения ставятся на отдельных участках профилей (кусочно-непрерывное профилирование) или в отдельных точках (точечное профилирование).

Однако высокую детальность исследований нельзя совместить с быстрым освоением больших территорий. Поэтому, наряду с созданием длинных профилей

наблюдений, развивается методика точечных зондирований. Основы этой методики создал Н.Н. Пузырев. Она использовалась для рекогносцировочных исследований больших территорий (Пузырев, Крылов, Потапьев, 1965).

В ряде районов СССР многоканальными станциями регистрируются большие промышленные взрывы на рудниках и в карьерах. Разрабатывается методика морского ГСЗ.

Объем работ по изучению коры и верхов мантии с помощью ГСЗ быстро увеличивался; с 1964 по 1968 г. он удвоился по сравнению с предыдущим десятилетием (Косминская, 1968, стр. 176). Общая длина сухопутных и морских профилей на конец 1968 г. составляла в СССР 54 000 км, а количество разрезов на всем земном шаре превышало 1200. Далее темп работ не уменьшился, и к 1973 г. на земном шаре было выполнено 230 000 км профилей ГСЗ, причем распределены они неравномерно – три четверти из них выполнены в океанах, остальные в основном на территории Северной Америки и Западной Европы (табл. 3):

Таблица 3

Распределение профилей ГСЗ на разных территориях

Страна	Количество профилей ГСЗ, пог. км на 1000 км <sup>2</sup> территории
СССР	2,0
США	5,0
Западная Европа	4,0
Мир в целом	0,5
(Вольвовский, Вольвовский, 1975)	

Сводки по ГСЗ можно найти в работах Н.А. Беляевского и др. (1969, 1970, 1971, 1972 и др.); А.А. Борисова (1967); И.С. и Б.С. Вольвовских (1973, 1973<sub>1</sub>, 1974); Р.М. Деменицкой (1967, 1969); В.З. Рябого (1965; Рябой, Старобинец, 1973, 1974) и др., а представление о темпе их роста – в работах П.С. Вейцман, И.П. Косминской (1964), И.П. Косминской (1966, 1966<sub>1</sub>), Ю.В. Ризниченко (1957).

Не имея возможности останавливаться на вопросах развития сейсмологии взрывов подробнее, отметим справедливость замечания американских исследователей Ф.Пресса и М.Юинга (1957) – сейсмология взрывов стала в последнее время ведущим источником надежных данных как для континентов, так и для океанов.

### 5. Расширение информационного обмена и международных связей

Одна из существенных тенденций развития современных исследований заключается в том, что не только увеличивается объем информации, но эта информация становится значительно доступней для большинства сейсмологов. Происходит это благодаря работе международных организаций, занимающихся сбором, хранением и распространением данных.

Началом такого объединения ученых многих стран можно считать 1905 г., когда в Берлине была создана Международная ассоциация сейсмологии (МАС), которую впоследствии (в 1951 г.) переименовали в Международную ассоциацию сейсмологии и физики земных недр (МАСФЗН). В 1906 г. в Риме было решено основать Международную станцию в Страсбурге, осуществляющую обмен информацией. Ее работа прерывалась первой мировой войной, а затем возобновилась под руководством Международного центрального сейсмического бюро (МЦСБ). В 1923 г. в Оксфорде началось издание Международной сейсмической сводки (МСС), которое осуществлялось в тесном сот-

рудничестве с МСБ. В 40-50-е годы объем публикуемой информации увеличился; МСС возросла с 220 в 1918 г. до 1250 в 1952 г.

МСС – не единственная мировая сводка сейсмических данных. Например, Береговая и геодезическая служба США получает данные сейсмограмм по телеграфу с большого числа обсерваторий, рассеянных по всему миру. Она издает за две недели карточки, на которых приводятся результаты быстрого определения времен и координат эпицентров всех крупных землетрясений. Бюллетени глобальных землетрясений выпускает и сейсмологическая ассоциация иезуитов. Обсерватория Доминион в Оттаве издает библиографию по сейсмологии.

В результате проведения МГТ для обобщения полученного в этот период огромного числа уникальных данных и обеспечения их доступности создана сеть мировых центров, в которых собираются, учитываются и хранятся данные геофизических наблюдений. Существует два типа Мировых центров данных: универсальные и по отдельным разделам исследований. Центров первого типа два: МЦД А – в США и МЦД В – в СССР. Центры второго типа (МЦД С) расположены приблизительно равномерно по всему земному шару, их 24. Сейсмологический МЦД С находится в Слоу (Англия). В МЦД А и В собирается материал более 300 сейсмических станций.

После начала работ по Проекту верхней мантии в наблюдательной сейсмологии, по словам И. Леман, наступила новая эра (Леман, 1964). Бурное увеличение "сырья", из которого в конце концов выводится большинство сведений о внутреннем строении Земли, привело к необходимости перестроить систему сбора, обработки и обмена информацией. В 1970 г. был создан единый Международный сейсмологический центр в Эдинбурге (МСЦ). К 1971 г. он уже обрабатывал в месяц более 40 000 наблюдений (Кондорская, 1971). Данные в этом центре обрабатываются на ЭВМ. Так как они поступают со станций не только в виде магнитных лент, но и в виде бумажных лент, станционных бланков и обычных бюллетеней, то машины переводят их на магнитные ленты. Специальная программа компоует их в хронологическом порядке, помогая избежать повторений. Данные за ряд предыдущих лет также переведены на магнитную ленту, что дало возможность автоматически вычислить место и время возникновения очагов. Предполагается механизировать весь процесс вычислений – от нанесения цифр на магнитную ленту на станции до публикации конечных результатов – сводных сейсмических бюллетеней и сводного каталога землетрясений мировой сейсмической сети станции по стандартной форме.

Международный сейсмический центр проводит также статистическую обработку данных, в частности анализирует динамические и кинематические характеристики объемных волн. Например, за 1964–1967 гг. обнаружены систематические расхождения данных близкой сейсмической сети Японии и МСЦ. Этот материал будет использован для определения аномалий времен пробега.

Кроме того, Центр составляет и публикует библиографию по сейсмологии, осуществляет архивизацию и обмен информацией (имеются в виду сейсмограммы и литература) (Кондорская, 1971).

Развиваются и международные связи. В 1955 г. они вступили в новый этап. Хотя сейсмические исследования лишь частично были включены в программу МГТ, но это способствовало общему подъему сейсмологии. В частности, Ассоциация сейсмологии и физики недр Земли систематически организуют ассамблеи, конференции и научные симпозиумы для разработки проектов и программ исследований, обмена опытом и взаимной информации, обсуждения результатов работ. Сейсмологи СССР участвуют в качестве экспертов ЮНЕСКО в работах международных сейсмологических научных и учебных институтов в Японии и Югославии, где ведут преподавательскую и научную работу. В возрастающих масштабах налаживается обмен публикациями между учеными и учреждениями.

## 6. Получение новых видов информации о строении мантии

### Изучение динамических характеристик сейсмических волн

Исследование, наряду с кинематическими параметрами сейсмических волн, их динамики (амплитуд, углов выхода, спектров и т.д.) весьма плодотворно для изучения мантии, поскольку динамические характеристики волновых процессов являются, по словам их исследователей, хотя и капризным, но весьма чувствительным инструментом в деле изучения физических свойств среды, в которой распространяются волны (Болдырев, 1970; Халтурин, 1966).

Очень эффективным для изучения мантии оказалось привлечение амплитудных кривых.

Первые амплитудные кривые построили Б.Гутенберг (Gutenberg, Richter, 1939; Gutenberg, 1948), канадец Дж. Де Бреммекер (De Bremaecker, 1955), чешская исследовательница Л.Рупрехтова (Ruprechtová, 1959) и американец К.Ромни (Romney, 1959). Эти кривые отражали лишь в самых общих чертах поведение амплитуд объемных волн. И все-таки даже в 50-е годы исследование амплитуд внесло определенный вклад в уяснение строения мантии.

Используя наблюдения за амплитудами смещений в продольных и поперечных волнах, советские исследователи А.В. Введенская и Л.М. Балакина установили, что механические свойства мантии на глубинах 250–500 и 900–1000 км отличаются от свойств остальной оболочки. К этим же глубинам приурочены уже обнаруженные ранее границы раздела (500 км – Голицына; 950, 1200 – Репетти, Гутенберга; и др.) (Введенская, Балакина, 1957). Эти авторы показали, что особенности полей смещений на глубинах 250–500, 900–1000, 1200–1300, 1800 и 2200 км могут быть вызваны поляризацией поперечных волн при двойном лучепреломлении. Иными словами, вполне возможно, что в мантии на указанных глубинах расположены анизотропные слои (Введенская, Балакина, 1959).

Е.И. Широкова (СССР), проведя исследование амплитуд продольных волн Гиндукушских землетрясений с глубиной очага около 200 км, обнаружила, что "слой пониженной скорости, начинающийся, как предполагают, на глубине 60–100 км, простирается по крайней мере до глубины 200 км и имеет достаточно резкие границы" (Широкова, 1959). После 1960 г. амплитудные кривые стали использоваться для изучения строения мантии значительно шире, поскольку выяснилось, что их небольшие изменения свидетельствуют о наличии малых колебаний скоростей сейсмических волн (Vaněk, Stelzner, 1960). Были построены амплитудные кривые для различных районов: чешские сейсмологи И.Ванек, И.Штельцнер и К.Раду строят кривые разных типов волн для Европы, а затем для Малой Азии. С.Л. Соловьев и О.Н. Соловьева (СССР) – для Курило–Камчатского региона, Л.Н. Малиновская (СССР) – для Средней Азии. В США амплитудные кривые строятся по подземным ядерным взрывам (Romney, Brooks et al., 1962; Ryall, Stuart, 1963; Springer, 1966; Jordan, 1965; и др.).

Сначала изменения амплитуд учитывались при интерпретации качественно (Гутенберг, 1963; Джеффрис, 1960; Lehmann, 1955). С середины 60-х годов началось их количественное использование для построения скоростного разреза мантии. Например, английский сейсмолог Г.Джеффрис и его коллега из Израиля М.Шимзони (Jeffreys, Shimshoni, 1966) по сглаженным амплитудным кривым Ванека и Штельцнера (1964) вычисляют годографы первых вступлений продольных и поперечных волн, налагая условия, чтобы в четырех точках вычисляемая кривая совпадала с экспериментальным годографом. Затем они методом Герглотца–Вихерта строят скоростной разрез, удовлетворяющий и амплитудной кривой, и годографу.

Так как количественно оценить скоростной разрез по амплитудным кривым чрезвычайно сложно, то следующим шагом в их интерпретации можно считать эксперименты на двумерных (Riznichenko, Shamina, 1964; Shamina, 1966) и трехмерных (Vaněk, 1966) моделях, воспроизводящих распространение волн в мантии с определенным распределением скоростей. Моделирование внесло большой вклад в изучение строения мантии (о чем подробнее будет сказано

дальше). В частности, оно показало, что амплитудную кривую в Юго-Восточной Европе можно объяснить только исходя из варианта, при котором мантия должна содержать волновод на глубине около 100 км и границу на глубине 400 км. Любопытно, что эта структура объединяет скоростные модели Гутенберга и Джеффриса. Кроме того, возможны еще две границы (150 и 200 км) (Vaněk, 1966).

Изучение амплитудных кривых в 60-е годы выявило неоднородное строение мантии. Например, их сопоставление для Европы и Средней Азии показало, что строение мантии значительно сложнее, чем следует из модели Буллена, и что основные отличия относятся к области, расположенной между границей Мохоровичича и волноводом (Ванек, 1972). Другим примером может служить сопоставление амплитудных кривых для Малой Азии (Vaněk, 1961) и Юго-Восточной Европы (Vaněk, 1966). Кривые хорошо согласуются, за исключением минимума в зоне тени, который для Азии смещен в сторону меньших эпицентральных расстояний. Это свидетельствует о меньших глубинах кровли волновода, что подкрепляется и данными ГСЗ на Черном море (Непрочнов, 1959, и др.).

Дальнейшие работы в этом направлении не только подтвердили наличие астеносферы и горизонтальных неоднородностей в мантии, но и вскрыли чередование в ней высоко- и низкоскоростных зон, наличие разделов первого или второго рода (например: Соловьев, Соловьева, 1967; Тараканов, Левый, 1967, 1969; Hill, Pakiser, 1968).

Поскольку уяснение строения оболочки с помощью амплитудных кривых все-таки затруднительно — чтобы получить их непосредственно из наблюдений, надо учитывать стационарные поправки и поправки за магнитуду землетрясения (Vaněk, Stelzner, 1960), — то в ряде работ с этой целью используют зависимость от эпицентрального расстояния  $A(PP)/A(P)$  (отношение амплитуд обменных и продольных волн). Эта идея впервые была высказана К. Цёппритцем (Zöppritz et al., 1912) и в дальнейшем неоднократно применялась для уточнения скоростного разреза оболочки (Gutenberg, Richter, 1934–1935; Саваренский, 1955; Papazachos, 1949). При этом выяснилось, что дисперсия точек около осредняющей кривой чрезвычайно велика (Саваренский, 1955; Papazachos, 1949; Byerly et al., 1949; Mei, 1943). Установить причины этого явления и уточнить скоростное строение мантии оказалось возможным благодаря исследованию устойчивости относительных амплитудных кривых, построению теоретических отношений  $A(PP)/A(P)$  для различных их моделей Земли и сравнению их с наблюдаемыми (Клименчук, Яновская, 1966). В результате было показано, что и разрез Гутенберга, и разрез Джеффриса следует уточнить, вводя на глубинах 300–400 км более быстрое нарастание скоростей с глубиной, чем в обоих указанных моделях.

Полезным оказалось применение амплитудно-фазового анализа. На его основе разработана методика выделения разного типа волн, с помощью которой получены более точные годографы и построено большое количество границ в мантии (Болдырев, 1970).

Для изучения строения мантии используются также углы выхода продольных волн. Разработанный еще Б.Б. Голицыным метод нашел свое дальнейшее развитие в работах советских исследователей: Е.Ф. Саваренского, Ф.И. Монахова, Н.В. Айвазова (Саваренский, 1948, 1952; Саваренский, Айвазов, 1958; Саваренский, Монахов, 1948) и др. Методика определения скоростного разреза мантии по углам выхода продольных волн от землетрясений и промышленных взрывов была разработана Н.А. Афанасьевой и Н.К. Булиным (1969). Воспользовавшись ею, авторы построили до глубин 80 км скоростной разрез Юго-Западного Алтая. Они отметили, что точность этого метода не сильно отличается от точности построения годографа рефрагированных волн, но зато этот метод не зависит от точности определения момента взрыва, и, что очень важно, дает дополнительную информацию, а следовательно, повышает достоверность наших знаний о строении верхней мантии.

Г.Н. Бугаевский (СССР) предложил использовать для выяснения внутренних неоднородностей планеты систематическое определение направлений прихода сейсмических волн от разных эпицентральных зон в различные точки земной поверхности и сравнение действительных углов прихода с соответствующими сферически симметричной Земле. Он разработал методику, более или менее осредняющую флуктуации направлений, связанные со случайными, локальными неоднородностями на трассе луча, с помощью определения направления прихода по моментам вступления волны на группу станций (Бугаевский, 1968). Воспользовавшись ею для китайской и американской групп станций, охватывающих территории в несколько сотен километров, автор показал, что определенные им аномалии углов выхода свидетельствуют о наличии в мантии под этими группами станций слоев пониженных скоростей (Бугаевский, 1970).

С появлением различных способов фильтрации сейсмических сигналов, с развитием динамической теории распространения волн и модельных исследований, с появлением вычислительной техники нашел применение в сейсмологии спектральный анализ (Болдырев, 1970). Одно из самых важных применений спектрального анализа сейсмических волн — определение поглощающих параметров среды, в которой распространяются сейсмические волны (см. поглощение сейсмических волн в мантии).

Примером ориентировочного построения модели среды, которая качественно удовлетворяла бы годографам, амплитудным кривым и частотным особенностям волн, может служить работа С.М. Зверева (1970).

Использование динамических характеристик сейсмических волн наталкивается на большие трудности из-за сильного разброса экспериментальных данных на графиках динамических величин. Это ставило под сомнение получение из сейсмологических наблюдений достаточно важных и объективных данных, пригодных для количественной интерпретации.

Однако работы в области статистического исследования тех многофакторных закономерностей, которые выявляются на фоне значительного рассеяния индивидуальных данных, количественное их описание и анализ дисперсии данных (Антонова и др., 1968; Халтурин, 1966) показывают, что при определенном подходе к отбору сейсмического материала и при тщательной его обработке можно получить вполне надежные, статистически достоверные сведения о динамических зависимостях. Установление объективного характера этих зависимостей, осознание их информативности открыло широкую перспективу: по мере развития теории интерпретации и специальной постановки динамических исследований стало возможным использовать динамику сейсмических волн для построения скоростного разреза мантии.

По мнению В.И. Халтурина (1966), не исключено, что в будущем, при массовом переходе на магнитную запись, первичная обработка записей землетрясений (идентификация фаз, определение расстояния до очага и магнитуды землетрясения) будет автоматизирована и тогда количественное описание наблюдаемой динамической картины будет служить, наряду с годографом, этапом, по которому будет осуществляться первичная обработка записей.

### Моделирование сейсмических явлений

Как мы уже отметили выше, моделирование сейсмических явлений оказалось весьма ценным для изучения строения мантии. Особенно велика его роль в тех случаях, когда обычные методические приемы получения и трактовки данных оказываются бессильными. Дело в том, что многие вопросы распространения сейсмических волн не могут до конца решаться теоретически ввиду сложности строения среды, а экспериментальные наблюдения не решают вопроса, так как это строение неизвестно. Поэтому во многих случаях моделирование распространения волн и сравнение полученных наблюдений с натурными позволяют получить нужное решение (Коридалин, 1966, стр. 388), несмотря на определенные ограничения этого метода и необхо-

димось каждый раз обосновывать правомерность перенесения результатов модельного эксперимента на сейсмические явления (Петрашень, 1964, 1966).

Цель сейсмического моделирования в том, чтобы подсказать сейсмологам, на какие кинематические и динамические свойства волн следует обращать внимание при решении той или иной задачи (Шамина, Ханутина, 1967).

При выяснении внутреннего строения мантии либо на основании экспериментальных данных строят модель (например, Хорошева, 1960), либо поступают наоборот (Хорошева, 1962, Ризниченко, Шамина, 1963, 1964; Шамина, 1966, 1971; Шамина, Ханутина, 1967 и др.). В первом случае берутся полученные в естественных условиях голографы или амплитудная кривая и подбирается экспериментальная модель с таким скоростным разрезом, при котором экспериментальные модельные характеристики лучше всего совпадают с наблюдениями. Соответствующий скоростной разрез приписывается определенному региону со степенью точности, определяемой полнотой данных.

Во втором случае "проигрываются" различные модели с более или менее вероятными скоростными разрезами. Исследуется волновая картина, устанавливаются характерные для каждого типа разреза признаки. Обнаруженные в естественных условиях, эти признаки свидетельствуют в пользу того или иного скоростного разреза на определенных глубинах (Шамина, 1971).

Модельные исследования не только подтвердили характером изменения амплитудных кривых наличие волновода в мантии (например, Хорошева, 1960, 1962; Ризниченко, Шамина, 1963), но дали возможность сформулировать необходимые (Шамина, 1966), а также необходимые и достаточные (Шамина, 1966) признаки волновода. Это позволило оценить с помощью полученных критериев различные модели мантии (Шамина, Ханутина, 1967). Подобная сравнительная оценка моделей Гутенберга, Джеффриса и Леман показала наличие волновода в мантии (Шамина, 1971), что послужило основанием для натуральных исследований изменения с глубиной амплитуд волн, возникающих при гиндукушских землетрясениях, и привело О.Г. Шамину к выводу о возможном существовании в мантии Центральной Азии волновода с осью на глубине 160 км.

Моделирование дало возможность не только разработать критерии отсутствия или наличия волновода в мантии, но и выяснить некоторые особенности волноводов. Были изучены модели сильных (Ризниченко, Шамина, 1963) и слабых (Vaněk, Waniek et al., 1964; Vaněk, 1966) волноводов с резкими границами (Хорошева, 1962), с горизонтальными неоднородностями (Ивакин, Капчан, 1968), с погружающейся осью (Шамина, 1970).

### Изучение поверхностных волн

Задача объяснить наблюдаемую на сейсмограммах дисперсию поверхностных волн исходя из некоторой модели слоистой Земли встала перед сейсмологией в конце 50-х годов нашего века, после того как были разработаны совершенные методы измерения групповой и фазовой скоростей поверхностных волн путем анализа из сейсмограмм или спектров во временной или частотной области, а американский сейсмолог Н.А. Хаскел (Haskell, 1953) и его советский коллега В.И. Кейлис-Борок (1960) создали математический аппарат для расчетов дисперсии поверхностных волн при различных моделях строения Земли.

К этому времени был накоплен большой материал. В частности, одним из специальных, нестандартных видов исследований по программе МГТ было изучение длиннопериодных сейсмических волн ("Annals ... XXXVI"). Полученное в результате множество сейсмограмм с четкой записью поверхностных волн стало возможным обработать с помощью электронно-вычислительной техники. Появление ЭВМ позволило точно и быстро рассматривать теоретические дисперсионные кривые, "подгонять" их к реальным и выбирать соответствующие оптимальные модели среды, для которых расхождение теории и эксперимента минимально.

Исследование поверхностных волн вступило в стадию количественных расчетов — они стали широко использоваться для выяснения внутреннего строения Земли ("Верхняя мантия Земли", 1964; Магницкий, 1965; "Строение Земли по поверхностным сейсмическим волнам", 1965; "The Earth's mantle", 1967; Kovach, 1965; Kovach, Anderson, 1964). За 15 лет после начала МГГ было опубликовано более 100 работ, в которых с помощью дисперсии поверхностных волн уточнялось строение коры и мантии (Брюн, 1972). Были построены, например, разрезы мантии океанов (Landisman et al., 1959; Sykes et al., 1962), океанов и континентов (Dorman et al., 1960), различных тектонических зон: Канадского щита (Brun, Dorman, 1963), центральной части США (McEwili, 1964), Альпийского пояса (Knopoff et al., 1966), Японии (Aki, 1961), Тихоокеанских впадин (Saito, Takeuchi, 1966); Исландии (Triggvason, 1962) и др.

Хотя эти исследования поверхностных волн базировались на весьма существенных упрощениях, главное из которых заключалось в аппроксимации среды системой однородных слоев, но даже такой подход помог выявить весьма существенные закономерности внутреннего строения мантии. Во-первых, было окончательно доказано наличие в мантии астеносферы и, во-вторых, установлено существование горизонтальных неоднородностей.

Выяснилось, что фазовые скорости поверхностных волн для океанических трасс выше, чем для трасс, пересекающих континенты (Aki, Press, 1961; Båth, 1959; Dorman et al., 1960; Kuo et al., 1962; Toksöz, Ben-Menahem, 1963; и др.). Различия были обнаружены и в пределах континентов, при изучении различных тектонических блоков. Оказалось, что под Канадским щитом и аналогичными районами скорости поверхностных волн в мантии выше (Brun, Dorman, 1963; Ewing, Press, 1959; Press, 1957), а под тектонически активными районами ниже (Aki, Kaminuma, 1963; Brun, 1960; Brun, Ben-Menahem, 1961; Brune, Nafe, Alsop, 1961), чем в среднем для континентов (Båth, 1959; Båth, Vogel, 1957; Ewing, Jardetzky, Press, 1957; Kovach, 1959; Porkka, 1960, 1961; Press, Ewing, Oliver, 1956).

Интересно, что дисперсия волн Лява не дала такого сильного уменьшения скоростей поперечных волн в тектонических активных районах, как дисперсия волн Релея. Японские исследователи К.Аки и К.Каминума заметили, что особенно отчетливо это расхождение наблюдается в таких районах, как Япония (Aki, Kaminuma, 1963). По мнению Д.Андерсона, оно вызвано анизотропией верхней мантии. Такая анизотропия может послужить причиной существования там тонких ослабленных слоев или магматических каверн, имеющих форму сплюсненного сфероида (Aki, Kaminuma, 1963).

И все-таки, несмотря на эти расхождения, обобщение данных по дисперсии волн Лява, огибающих Землю и проходящих через разные тектонические районы, также подтвердило, что самые низкие скорости характерны для орогенных поясов, промежуточные — для океанов, а самые высокие — для щитов (Toksöz, Anderson, 1966).

Многочисленными наблюдениями региональных вариаций групповой скорости поверхностных волн установлено, что волновод в верхней мантии под океанами выражен отчетливее и располагается ближе к земной поверхности, чем под континентами. Кровля этого слоя под океанами определена на глубинах 50–60 км (Anderson, Toksöz, 1963; Dorman, Ewing, Oliver, 1960; Saito, Takeuchi, 1966), а под материками — на глубинах 100–200 км (Dorman et al., 1960). Последующие, более детальные, работы подтвердили этот вывод для Тихого океана (Press, 1961, 1961), а для Атлантического и Индийского выявились расхождения, свидетельствующие о том, что скорости S-волн могут отличаться от скоростей Тихого океана на 0,1 км/сек или же верхняя граница слоя пониженных скоростей располагается здесь еще выше — примерно на 20 км (Aki, Press, 1961).

Под Тибетом (Santo, 1961), Андами, Западным горным поясом США и Альпами низкоскоростная зона верхней мантии также аномально приближена к дневной поверхности.

Впоследствии различия в глубине залегания волновода подтверждались неоднократно. Было показано, что скоростные неоднородности мантии простираются до глубин 250 км (Вгип, Дорман, 1963). В 1972 г. американский исследователь Д. Дорман, составив сводку по фазовым скоростям поверхностных волн, пришел к выводу о сравнительной однородности мантии под впадинами Тихого океана и о значительно большем разнообразии ее строения под континентами, а также о том, что различие в строении древних (стабильных) и молодых (орогенических) континентальных областей простираются до глубин не менее 200 км (Дорман, 1972).

Эти выводы были впоследствии подтверждены при изучении собственных колебаний Земли ("Собственные колебания Земли", 1964), на истории исследований которых мы не имеем возможности останавливаться.

Несмотря на успехи изучения поверхностных волн, их теория была разработана главным образом для слоисто-однородных сред и точечных источников возмущений (Кейлис-Борок, 1960; Петрашень, 1952; Петрашень, Енальский, 1956-1957; Яновская, 1958; Ewing et al., 1957; Harkrider, 1964; Haskell, 1953; Knopoff, 1964; Saito, 1967), и не могла быть применима для решения более тонких задач геофизики, в частности для выявления наличия волновода в мантии и выяснения его глубины.

С 1962 г. в отделе вычислительной геофизики Института физики Земли АН СССР при участии и под руководством А.Л. Левшина ведутся работы по дальнейшему развитию теории поверхностных волн. Она обобщается на вертикально и горизонтально неоднородные среды и произвольные источники возмущений. Разрабатывается методика математического моделирования полей поверхностных волн для условий, близких к реальным; она реализуется в комплексе программ для ЭВМ.

А.Л. Левшин предложил усовершенствованную методику спектрально-временного анализа (СВАН) на ЭВМ и продемонстрировал на модельных примерах ее эффективность при разделении интерферирующих гармоник волн Лява и Релея. Это радикальное усовершенствование первичной обработки сейсмограмм стало возможным благодаря развитию методов цифровой регистрации, позволяющих получать данные в виде, пригодном для ввода в ЭВМ (Дараган, Осадчий, 1967; Колесников, Соловьев, 1964; Осадчий, Дараган, 1966).

В результате удалось установить природу каналовых волн, по которым оценивают скорости поперечных волн в мантии. Одни авторы связывают каналовые волны с волноводами (например, Магницкий, 1965; Магницкий, Хорошева, 1960; Сихарулидзе и др., 1965; Тараканов, Ким Чун-Ун, Сухомлинова, 1970; Тараканов, Левый, 1970; Хорошева, 1960; Båth, 1957; Caloi, 1953, 1954; Gutenberg, 1955; Magnitsky, Khorosheva, 1961; Press, Ewing, 1954, 1955). Другие возникновения этих волн относят за счет интерференции высших гармоник поверхностных волн в моделях без волноводов (Båth, 1959; Ewing et al., 1957; Oliver et al., 1959; Oliver, Ewing, 1958).

Проводя спектрально-временной анализ поверхностных волн, А.Л. Левшин (1970) показал, что три наиболее четко выделяемые на сейсмограммах каналовые волны могут образовываться в среде с волноводом и без него. Основные причины их образования — резкая граница между корой и мантией и слоистость коры.

Разработаны теоретические методы инверсии дисперсионных кривых в скоростные разрезы, обзор которых дан в работе В.П. Валюса (1969). Благодаря развитию общей теории поверхностных волн, в частности применению для описания их свойств в вертикально неоднородной среде спектральной теории линейных дифференциальных операторов вместо аппроксимации среды системой однородных слоев, В.И. Кейлису-Бороку, В.П. Валюсу, А.Л. Левшину и др. удалось создать методику совместной интерпретации поверхностных и объемных волн.

Сведения о строении мантии основаны преимущественно на анализе полей без учета затухания сейсмической энергии. Однако учет рассеяния сейсмической энергии может дать дополнительные сведения о внутреннем строении Земли, и в частности мантии, характеризуя ее неупругие свойства.

Наибольший интерес для исследователей представляет изучение изменения поглощения с глубиной. Этой проблеме посвящено множество работ, в которых использовались разные методики, разные диапазоны исследуемых волн и разные исходные концепции. Это либо глобальные или региональные исследования, выясняющие поглощающие свойства среды на больших интервалах глубин и эпицентральных расстояний (Архангельская, Федоров, 1961; Архангельская, Старовойт, 1970; Кнопов, 1972; Пасечник, 1966; Anderson, Ben-Mehahem, Archambeau, 1965; Anderson, Kovach, 1964; Asada, Takano, 1963; Archambeau et al., 1969; Kanamori, 1967<sup>1</sup>, 1968; Kovach, Anderson, 1964; Lewis, Mayer-Rosa, 1968; Sato, 1967, и др.), либо детальные, дающие сведения о поглощении в более локальных, часто специфических, участках мантии (Болдырев, 1970; Горшков, 1956, 1958; Фарберов, 1970; Федотов, 1963; Oliver, Isaks, 1967; Utsu, Okada, 1968; Wadati, Hirono, 1956; и др.).

Для описания поглощения сейсмической энергии вводят связанный с этим поглощением безразмерный параметр — так называемый коэффициент добротности  $Q$ . Его изучение показало, что кора и мантия весьма различны по добротности (Кнопов, 1972; Anderson et al., 1965; Archambeau et al., 1969) что верхняя мантия характеризуется большим поглощением сейсмической энергии ( $Q = 160$ ), нежели нижняя ( $Q = 1450$ ), особенно для поперечных волн (Anderson, Kovach, 1964; Кнопов, 1972), и отличается большим поглощением поперечных волн, чем продольных (Triggvason, 1965; Seidl, Mueller, 1970, 1971; и др.).

Кроме того, в верхней мантии существуют зоны с повышенным и пониженным поглощением сейсмической энергии. Повышенное поглощение обычно свойственно слоям пониженных скоростей (Archambeau et al., 1969; Lewis, Mayer-Rosa, 1968; и др.). Так, в Центральной Европе области особо высокого поглощения для поперечных волн отмечены на глубинах приблизительно 80–110 и 150–220 км (Mueller et al., 1968), что соответствует двум низкоскоростным каналам по данным объемных волн (Ansorge, Mayer-Rosa, 1970) в Японии — около 100 км (Wadati, Hirono, 1956), под Южными Курилами — 60–110 км (Федотов, 1963; Болдырев, 1970).

Ряд авторов отмечают горизонтальные изменения поглощения в мантии. Например, советский сейсмолог А.А. Лукк (1970, 1971) описал повышенные поглощающие свойства Памиро-Гиндукушской фокальной зоны по сравнению с окружающей средой, а его коллега С.А. Болдырев (1970) выявил неоднородность поглощения Курило-Камчатской фокальной зоны вкrest ее простирания, хотя установлено сходство изменения поглощения с глубиной для камчатских и южнокурильских землетрясений. Последнее навело автора на мысль, что подобный ход поглощения, возможно, характерен и для других островных дуг Тихоокеанского кольца. Применяв новый способ изучения добротности мантии — зондирование методом сейсмически сопряженных точек, — Л.П. Винник и А.А. Годзиловская установили сильное увеличение поглощения в Байкальской рифтовой зоне и зоне перехода от Азиатского материка к Тихому океану.

Американские исследователи Ю.Херрин и Дж.Тэггарт (Herrin, Taggart, 1962) показали, что поглощение энергии в разных направлениях от места взрыва при эксперименте "Гном" связано с временем пробега по этим направлениям. В районах с низкой скоростью в верхней мантии поглощение энергии в ней высокое (и наоборот). Аналогичную зависимость подмечает их коллега Дж.П. Вуллард, сопоставляя скорости распространения сейсмических волн в мантии под США с анализом изосейст Чарлстонского землетрясения 1886 г. и Квебекского землетрясения 1935 г. ("Земная кора и верхняя мантия", 1972, стр. 109–110).

Советский сейсмолог А.И. Ферберов (1970) показал, что повышенными поглощающими свойствами по сравнению с окружающей мантией характеризуются "корни" камчатских вулканов. С другой стороны, американцы Дж.Оливер и Б.Айзекс, проанализировав землетрясения в районе Тонга-Кермадек, пришли к выводу, что и глубокие и поверхностные землетрясения возникают в аномальной зоне мощностью  $\sim 100$  км. Поверхность этой зоны погружается на запад под островную дугу до глубин  $\sim 700$  км, а приподнятое крыло выходит с восточной стороны дуги. Доказательство существования такой зоны - значительно меньшее затухание в ней объемных сейсмических волн (особенно  $S$ -волн) по сравнению со сходными глубинами в мантии вне этой зоны (Oliver, Isaks, 1967). Эти примеры можно продолжать и дальше.

Однако, несмотря на успехи изучения поглощения в мантии, тут имеются и серьезные трудности. Еще Б.Гутенберг пришел к выводу, что неоднородности коры и оболочки в верхних 200 км влияют на амплитуды  $P$ - и  $S$ -волн значительно существеннее, чем эффект поглощения, поэтому изучать его весьма сложно (Gutenberg, 19582). Это, видимо, сказывается и на результатах современных работ.

Противоречивость их проявляется, например, в оценке зависимости  $Q$  от частоты волны. Одни авторы считают, что такой зависимости не существует (например: Архангельская, Старовойт, 1970; Саваренский и др., 1961; Винник, Годзиковская, 1972; Ewing, Press, 1954; 1954<sub>1</sub>; Gutenberg, 19582; и др.), другие утверждают, что она есть (Knopoff, McDonald, 1958). Чешский исследователь В.Карник, например, находит, что коэффициент поглощения уменьшается с ростом периода (Karnik, 1956), а его американский коллега И.Сато (Sato, 1956), - что растет.

Анализ этих противоречий приводит к заключению о неоднозначности определения коэффициента затухания и о необходимости пересмотра основных определяющих его формул, т.е. о необходимости дальнейших теоретических разработок в этой области (Архангельская, Федоров, 1961 и др.).

### 3. КОРЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В НАУЧНЫХ ПОДХОДАХ К ИЗУЧЕНИЮ МАНТИИ

Резкое увеличение информации о мантии привело к тому, что основные вопросы, связанные с изучением ее строения, стали решаться на качественно ином уровне. В результате возник новый подход к оценке полученных результатов. Покажем на конкретном материале, как именно происходил этот процесс.

#### 1. Доказательства существования волновода, установление горизонтальных неоднородностей мантии. Недостаточность стандартного годографа

Одной из центральных проблем, касающихся строения верхней мантии, к концу 50-х и началу 60-х годов по-прежнему оставался волновод. С решением этой проблемы связано изменение в научных подходах к изучению мантии, поэтому остановимся на истории развития идей о волноводе.

Поток исследований, проводимых в конце 50-х - начале 60-х годов различными методами, казалось бы, свидетельствовал в пользу существования астеносферы. К выводу о ее существовании привели изучение распространения поперечных волн для "просвечивания" корневых вулканов (Горшков, 1956, 1958, 1958<sub>1</sub>), анализ записей прямых и отраженных от земной поверхности продольных волн (Vesonen et al., 1959), исследование амплитудных кривых объемных волн (Широкова, 1959; Ruprechtova, 1959), новый способ аппроксимации годографа (Бугаевский, 1960<sub>2</sub>), детальное исследование поперечных волн (Lehmann, 1961).

Наличие волновода подтвердил ряд авторов, проводящих исследования на моделях (Хорошева, 1960, 1962, 1963; Ризниченко, Шамина, 1963 и др.

более поздние работы), а также занимающихся так называемыми каналовыми волнами (Магницкий, 1958; Магницкий, Хорошева, 1960; Хорошева, 1960; Сихарулидзе и др., 1965; Капцан, Кисловская, 1966; Caloi, 1953; 1954; 1964; Gutenberg, 1955; Magnitsky, Khorosheva, 1961; Båth, 1966; Båth, Argo, 1963; Guidros, Baker, 1963; Dube, 1965). Хотя впоследствии мнения о природе каналовых волн разошлись, но на определенном этапе эти исследования, казалось, убедительно свидетельствовали о существовании астеносферы в мантии.

Самое доказательное подтверждение существования слоя пониженных скоростей было получено при изучении поверхностных волн. Первые же определения скоростей поверхностных волн, распространяющихся по длинным путям через континенты и океаны (4,41 км/сек), в сопоставлении со скоростями поперечных волн, определенных в верхах мантии при взрывах (4,7 км/сек), показали наличие в мантии астеносферы (Press, Ewing, 1956; Landisman, Sato, 1958). Так как значения скоростей поверхностных волн на континентальных и океанических путях различались не более, чем на 2%, то это привело к выводу о сходном строении недр всей Земли и, следовательно, о глобальности волнового (Press, 1959).

Анализ дисперсионных кривых волн Лява и Релея в сопоставлении с дисперсионными кривыми, соответствующими различным скоростным моделям мантии, выявил, что наилучшим согласием характеризуется модель Гутенберга (Landisman et al., 1959; Takeuchi, Press, Kobayashi, 1959; Dorman et al., 1960; Alterman et al., 1961; Anderson, 1962; Brun, Dorman, 1963), хотя некоторые авторы пришли к этому и не сразу (Oliver, Ewing, 1958).

Работы по изучению дисперсионных кривых длиннопериодных поверхностных волн также привели к заключению, что наилучшее согласие с наблюдениями дают дисперсионные кривые, рассчитанные для модели Гутенберга (Сихарулидзе, Ахалбедашвили, 1965; Старовойт, 1965; Саваренский, Старовойт, 1966; Сихарулидзе, 1969).

Однако говорить об окончательном триумфе идеи Гутенберга все-таки было нельзя. Даже во время наибольшего "благополучия" идеи волновода (в гутенберговском понимании) высказывались сомнения в его повсеместном распространении (Nishimura et al., 1958; Федотов, Кузин, 1963), проверка же точности годографов Джеффриса-Буллена, проводимая при помощи мощных взрывов, убедительно показала надежность построенного Джеффрисом скоростного разреза Земли (Коган, 1960; Пасечник, Коган, Султанов, Цибульский, 1960; Burke-Gaffney, Bullen, 1957; Carder, Bailey, 1958).

Итак, вопрос о повсеместном существовании в мантии слоя пониженных скоростей к 1960 г. оставался открытым, что прекрасно подтверждалось лозунгом Джеффриса: "В течение примерно 20 лет я настойчиво утверждаю, что претензии на окончательность любого научного вывода — это абсурд" (Jeffreys, 1939, p. 506).

Пришло это решение не сразу. Его предвосхищением можно считать работу Е. Ф. Саваренского (1940<sub>1</sub>), о которой мы упоминали выше, работу оставшуюся в тени, но между тем остро поставившую вопрос о неоднородности верхней мантии.

Остановимся кратко на истории окончательного установления этой неоднородности и на дальнейшем развитии в связи с этим научных подходов к изучению строения мантии.

В 1958–1959 гг., когда высказывались сомнения в существовании астеносферы или доказывалась ее реальность, речь шла обо всем земном шаре. Так, в 1959 г. Ф.Пресс писал: "Параметры, сильнее всего влияющие на скорость поперечных волн, вероятно, распределены в верхней мантии под океанами и континентами на глубинах свыше 50 км в основном одинаково. Это, в частности, температура, давление и состав" ("Верхняя мантия Земли", 1964, стр. 248). Однако все настойчивее проявляются признаки неправомерности подобной постановки вопроса: "Имеет смысл допустить существование локальных особенностей строения (природы и структуры) мантии Земли

на территориях Европы, Америки и Японии" (Nishimura et al., 1958; "Верхняя мантия Земли", 1964, стр. 125). Такого же мнения придерживалась И.Леман (Lehmann, 1958<sub>1</sub>), обнаруживш*ь* для ряда волн систематические расхождения с годографом Джеффриса-Бу.лена.

В 1959 г. американские исследователи М.Ландисмер, И.Сато и М.Юинг на основе расчетов дисперсионных кривых для разных моделей Земли и сравнения их с наблюдаемыми пришли к выводу "о наличии слоя пониженной скорости для поперечных волн на глубинах под континентами приблизительно от 100 до 200 км... Под океанами область пониженной скорости поперечных волн поднимается даже до глубин около 50 км, зона пониженной скорости толще, а значения скоростей ниже, чем под континентами" ("Верхняя мантия Земли", 1964, стр. 79). В 1960 г. к этому мнению присоединились Дж.Дорман, М.Юинг, Дж.Оливер (Dogman, Ewing, Oliver, 1960), в 1961 г. - К.Аки и Ф.Пресс (Aki, Press, 1961), в 1962 г. - Д.Л. Андерсон и др. (Anderson, 1962; Kuo et al., 1962), в 1963 - М.Токсоз и др. (Toksöz, Ben-Menahem, 1963; и др.).

Наличие горизонтальных неоднородностей астеносферы подтвердилось и другими методами. Б.Гутенберг, сопоставляя значения скоростей, определенных на разных глубинах, писал: "... зона пониженной скорости должна быть под океаническими областями шире, чем под континентальными, и должна иметь минимальную толщину под корнями гор" (Gutenberg, 1959, 1959<sub>1</sub>; "Верхняя мантия Земли", 1964, стр. 89-90). В том же 1959 г. Е.Весанен, М.Нурмиа и М.Т. Поркка, используя для определения глубины астеносферы разность времен отраженной и прямой продольных волн от удаленных землетрясений (Vesanen et al., 1959), получили следующие значения глубин "желоба" или уровня минимума скорости (в км) для разных районов:

Аляска . . . . .	45
Северная часть Японии . . . . .	80
Район Тонга . . . . .	95
Южная Америка . . . . .	120

Советский сейсмолог Н.В. Шебалин, рассматривая данные для землетрясений разных регионов, основываясь на эмпирической формуле Гутенберга, связывающей магнитуду, глубину очага и интенсивность землетрясения, и учитывая, что при положении очага ниже кровли астеносферы интенсивность поверхностных волн резко уменьшается, установил следующие глубины кровли волновода (в км) в разных районах:

Япония и Камчатка . . . . .	80
Памир и Гиндукуш . . . . .	80
Южно-Американские Анды . . . . .	65
Кавказ . . . . .	55
Карпаты . . . . .	100
о.Крит и Эгейское море . . . . .	90

(Shebalin, 1959).

Казалось, утвердилось мнение, что волновод существует повсеместно, но колеблется его глубина. Однако и это предположение в дальнейшем не подтвердилось.

В 1958 г. американские исследователи Д.Кардер и Л.Бейли (Carder, Bailey, 1958) по сейсмическим наблюдениям над ядерными взрывами в Неваде и Тихом океане установили границу в мантии на глубинах 160-185 км; японские геофизики Э.Нисимура, И.Кисимото и А.Камицуки, исследуя годографы и амплитудные кривые различных волн от сильных землетрясений, происшедших в районе Камчатки, Курил и Тайваня и наблюдавшихся в Японии, кроме 20<sup>0</sup>-й, установили еще одну границу - около 25<sup>0</sup>, т.е. на глубине около 400 км (Nishimura et al., 1958). Их советские коллеги А.В. Введенская и Л.М. Балакина (1957, 1959), изучая особенности полей смещения попереч-

ных волн, выявили, как мы уже указывали, в верхней мантии границы на глубинах 250 и 950 км; Г.Н. Бугаевский (1957<sub>1</sub>), аппроксимируя по особой методике годограф тайванских землетрясений, отметил разрывы скорости в верхней мантии на глубинах 250, 500, 900 и 1000 км, а выясняя связь между годографами продольных и поперечных волн, он обнаружил их на глубинах 200–300 и 900 км. Дж. Хоффман (Канада) с соавторами (Hoffman et al., 1961) при изучении взрывов обнаружил границы на глубинах 190–210, 520–555 и 910 км. Было ясно, что от региона к региону одна граница и даже пределы одного слоя от 160 до 950 км меняться не могут.

Сложилось мнение, что в мантии под весьма различным по толщине и глубине волноводом есть еще границы, расположенные глубже, например, джеффрисовская граница нарастания скоростей (Nishimura et al., 1958; Vesanen et al., 1959). Эта идея и затруднения, с которыми столкнулись авторы при ее разрешении, связаны уже с более поздними и детальными исследованиями мантии, однако мы забежим несколько вперед, чтобы не нарушать последовательности изложения, касающегося развития концепции волновода.

К 1967 г. было установлено, что глубины кровли волновода, по данным различных авторов, варьируют от 40 (Vesanen et al., 1959) до 150 км (Lehmann, 1964 – для Европы), а толща всего слоя – от 40 до 300–350 км (Shebalin, 1959; Федотов и др., 1961, 1964 и др.; Brooks, 1962; Lehmann, 1961, 1964 и др.; Knopoff et al., 1966; Saito, Takeuchi, 1966; Лукк, Нерсесов, 1965; и т.д.).

Казалось, подтверждается мысль Весанена и др. (Vesanen et al., 1959), пытавшихся спасти идею гутенберговского волновода при условии значительного колебания его границ: ось этого слоя колеблется от 45 км на Аляске до 120 км в Южной Америке. Канадец М. Берри и его американский коллега Л. Кнопов (Berry, Knopoff, 1967) как будто подтвердили справедливость этих соображений. Они выделили в Западном Средиземноморье волновод, кровля которого колебалась от 50 до 100, а подошва от 170 до 250 км. Однако у этих авторов получилось, что ось волновода колеблется незначительно (от 120 до 150 км, а не на 75 км, как у предыдущих авторов). В сочетании с мнением об отсутствии в некоторых районах волновода (например, Федотов, Кузин, 1963) данные Берри и Кнопова представляли собой весьма веские аргументы против концепции Гутенберга.

Эти возражения отпарировал советский сейсмолог Р.З. Тараканов (1965; Тараканов, Левый, 1965 и др.), но он же изменил и само представление о слое пониженных скоростей, выдвинув полиастеносферную концепцию волновода.

Первые прямые сейсмические подтверждения существования в мантии нескольких волноводов получены для Японо-Курильской зоны (Федотов и др., 1964) и для Азии (Лукк и Нерсесов, 1965). Р.З. Тараканов построил для Японо-Курильского региона скоростной разрез, на котором он выделил четыре волновода до глубин 600 км (Тараканов, Левый, 1965, 1967, 1969). Сформировавшуюся к 1965 г. полиастеносферную концепцию впоследствии подтвердили работы А. Ибрагима и О. Наттли (Ibrahim, Nuttlei, 1967) – для США; Б. Мохаммодиона (Mohommadioun, 1967) – для Греции; Ст. Мюллера (Mueller, 1968) – для Европы.

Кроме того, наличие нескольких волноводов было подтверждено немонотонными производными годографа (Бугаевский, 1960<sub>1</sub>, 1964) и осциллирующими амплитудными кривыми для Европы (Vanek, 1966, 1967, 1968; Vanek, Radu, 1964; Vanek, Stelzner, 1962); для Средней Азии (Халтурин, 1966; Антонова и др., 1968), Курило-Камчатского региона (Соловьев, Соловьева, 1967; Solovyov, Solovyova, 1968).

Глубины залегания астеносфер и их толщина колеблются от района к району. По мнению Тараканова, рядом с волноводами могут существовать и границы роста скоростей или их градиентов. Чередование высокоплотных и низкоплотных слоев и пересечение их фокальными зонами создают в мантии своеобразную "мозаику" скоростей (Тарканов, 1969).

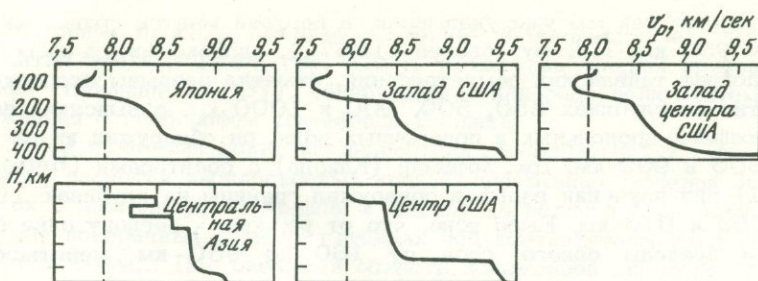


Рис. 5. Скоростные модели верхней мантии для различных тектонических районов по данным Лукка и Нерсесова (1965), Джонсона (Johnson, 1967), Канамори (Kanamori, 1967) и Аршамбо (Archambeau, 1969). Взято из статьи (Kanamori, 1971)

Наряду с вескими доказательствами наличия астеносферы выяснилось, что строение этого слоя весьма сложное, а горизонтальные неоднородности в мантии так велики, что в одних регионах волновод может совсем отсутствовать (например, центральные и северо-восточные районы США), и для них вполне справедлива точка зрения Джеффриса, а в других (Сахалин, Курилы) отмечается несколько астеносфер (65, 120, 230, 370 км).

Изучение неоднородностей в мантии постепенно переросло в самостоятельную проблему. "Интерес к "горизонтальным неоднородностям" постепенно становится в один ряд с проблемой "волноводов" в земной коре и верхней мантии. Наряду со слоями пониженных скоростей горизонтальные неоднородности могут являться характернейшей деталью строения верхней части разреза, а возможно и более глубоких областей в мантии Земли. Правда, применять этот термин надо пока крайне осторожно, поскольку нигде не сформулировано, что следует понимать под "горизонтальными неоднородностями". Этот термин может включать в себя и просто резкие региональные особенности в глубинном строении различных геофизических зон и в этом смысле он вполне понятен и вероятен. Кроме того, под ним можно понимать непараллельность выделяемых границ раздела в верхней мантии, изменение мощности волноводов вплоть до возможного их "выклинивания", причем по-разному в различных азимутах, плавное изменение упругих характеристик скоростного разреза оболочки в горизонтальном направлении, различное по разным азимутам и т.д. Эта последняя точка зрения смыкается в некотором смысле с понятием региональных особенностей, но далеко не тождественна этому понятию. По сути дела, во втором случае мы не имеем постоянного разреза в регионе, содержащем "горизонтальную неоднородность", а разрез все время меняется от точки к точке" (Лукк, 1965, стр. 197).

Для установления характера этих изменений потребовалась организация детальных работ по выяснению строения мантии, проводимых в различных регионах по комплексной методике.

Итак, в классический период дискуссия о наличии волновода в мантии привела к отрицанию однозначной трактовки индивидуализированных годографов для формирования представлений о строении всей мантии. На смену ей пришла однозначная трактовка стандартного годографа. Теперь решение той же проблемы на качественно ином уровне привело к пониманию ограниченности применения стандартного годографа. Мантия настолько неоднородна, что средние цифры для нее не характерны. Для выяснения ее конкретного строения в том или ином регионе нужны детальные исследования в этих районах — в этом смысле происходит отрицание стандартного годографа и замена его индивидуализированными.

Региональные скоростные разрезы мантии строятся с помощью кинематических невязок по отношению к годографу Джеффриса-Буллена, например —

в зоне перехода к Тихому океану (Федотов, Славина, 1968; Кондорская, Славина, 1969; Славина, 1970; Tryggvason, 1964; Husebye, 1965; Walker, 1965; Hales, Doyle, 1967; Ibrahim, Nuttly, 1967; Oliver, Isacks, 1967; Utsu, 1967; Hales et al., 1968; Kanamori, 1968; Ichikawa, 1969; Kobayashi, 1969; Nuttli, Bolt, 1969; et al.). В одних случаях при интерпретации невязок происходит подбор моделей среды (Utsu, 1967; Jacob et al., 1970; Sorrells et al., 1971). В других учитывается их изменение с расстоянием для определенных азимутов или регионов, затем невязки суммируются со стандартным годографом, получается "исправленный" годограф Джеффриса-Буллена, для которого создается скоростной разрез (Кондорская, Славина, 1969; Славина, 1970; Алексеев и др., 1969, 1971). Примеры региональных разрезов можно видеть на рис. 5.

Еще больший прогресс в развитии научных подходов к изучению мантии связан с развитием теории интерпретации данных, с информационным взрывом в сейсмологии и внедрением ЭВМ.

## 2. Информационный взрыв и внедрение ЭВМ в сейсмологию

Рост сети сейсмических станций, создание профильных систем наблюдений и развитие сейсмологии взрывов привели к тому, что большая часть данных о строении земной коры и мантии получена с 1948 г. С тех пор количество экспериментальных данных удваивается каждые три года ("Физика земной коры и верхней мантии", 1966, стр. 55). Сейчас на Земле работает более 1300 сейсмических станций. Они записывают ежегодно около 250 000 землетрясений. В среднем при этом получается порядка 1 000 000 трехкомпонентных записей - 3 000 000 кривых. Эти записи вместе с данными физики и геологии представляют исходный материал для разработки основных проблем сейсмологии (Кейлис-Борок, 1968, стр. 517). Кроме того, с помощью ГСЗ, наблюдений над близкими землетрясениями и ядерными взрывами получено несколько сотен разных годографов для различных районов Земли, и количество таких наблюдений увеличивается лавинообразно.

Повысился не только объем, но и детальность изучаемых данных. Так, проблема установления волнового в мантии сводится к установлению снижения поперечных волн всего на 100-200 м/сек при значениях скоростей порядка 5 км/сек.

В.И. Кейлис-Борок отметил, что после начала работ по международным геофизическим проектам за 10-15 лет потребовалось на полпорядка-порядок увеличить точность анализа исходных данных, соответственно на один-два порядка увеличился их объем.

Процесс информационного взрыва в сейсмических исследованиях верхней мантии можно проиллюстрировать кривой роста числа публикаций на эту тему с годами, составленным на основе нашего библиографического указателя (рис. 6), а также кривой роста публикаций по естественным наукам, физике и математике (рис. 7, 8), которые мы составили по материалам Книжной палаты. На этих рисунках видна широко известная в настоящее время тенденция экспоненциального роста публикаций.

Подмеченный в конце XIX в. информационный взрыв в науке характеризуется резким увеличением темпов познания. О законе ускоренного развития науки писал Ф.Энгельс: "Наука движется вперед пропорционально массе знаний, унаследованных ею от предшествующего поколения"<sup>1</sup> и с XVI в. "пошло гигантскими шагами также и развитие науки, которое усиливалось, если можно так выразиться, пропорционально квадрату расстояния (во времени) от своего исходного пункта"<sup>2</sup>.

Количественно этот закон доказал профессор Института истории науки и техники Йельского университета (США) Д. Прайс<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> К. Маркс, Ф. Энгельс. Соч., т. 1, стр. 568.

<sup>2</sup> К. Маркс, Ф. Энгельс. Соч., т. 20, стр. 347.

<sup>3</sup> Д. Прайс. Наука о науке. М., "Прогресс", 1966.

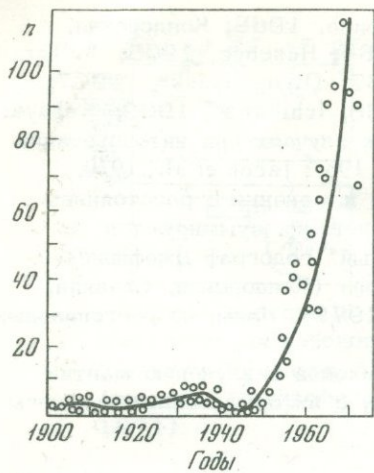


Рис. 6

Рис. 6. Рост количества публикации (n) по сейсмологии верхней мантии

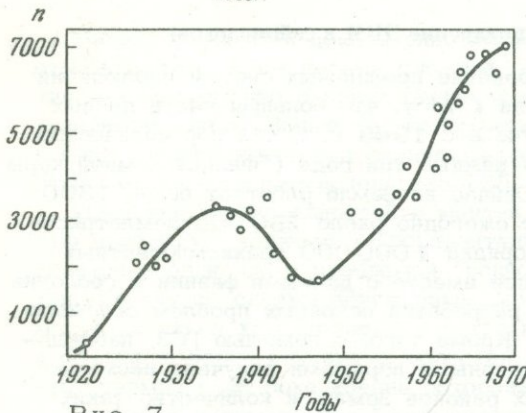


Рис. 7

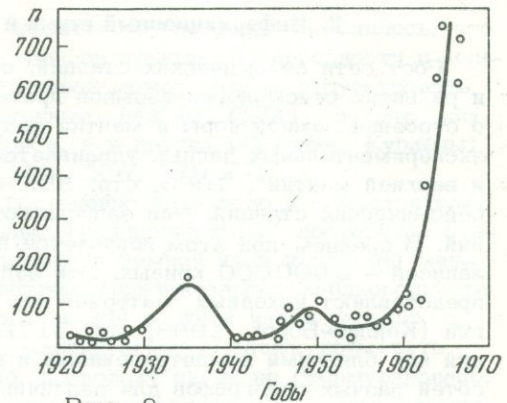


Рис. 8

Рис. 7. Выпуск книг по математике и естественным наукам

Рис. 8. Выпуск научной литературы по физике

В области геологии ускорение темпов накопления знаний подтвердил профессор МГУ Д.И. Гордеев, проанализировав весь длительный путь развития геологических наук. В частности, он отмечает, что "для геологических наук этот закон ускоренного развития начинает ясно проявляться с середины XVIII в."<sup>1</sup>

Аналогичное ускорение темпов развития наблюдается и в геофизике. Например, выступая на XIV Генеральной ассамблее МГТС, член-корреспондент АН СССР Ю.Д. Буланже привел такие данные: "Человечество затратило 250 лет на то, чтобы выяснить размеры Земли, 70 лет - чтобы установить ее сплюснутость у полюсов. Появление же современной техники, особенно спутников, позволило решить задачу формы и размеров нашей планеты в десять раз точнее всего за три года".

Проблемы, вставшие перед наукой в связи с развитием этого процесса, убедительно сформулировал Дж.Бернал. Отмечая, что в результате информационного взрыва в свет выходит более 10 000 почти некоординируемых научных журналов, он указывает на невозможность переработать эти сведения по-старому. "Во многих областях создано такое положение, когда, по сути дела, легче открыть новый факт или создать новую теорию, чем удостовериться в том, что они еще не были открыты или выведены. Может показаться, что единство науки грозит рухнуть под своей тяжестью"<sup>2</sup>.

Еще острее эта проблема встала десятилетие спустя. В узкой отрасли науки и техники ежедневно в мире появляется 1400 страниц печатного текста...

<sup>1</sup> Д.И. Гордеев. История геологических наук, ч. II. М., Изд-во МГУ, 1972, стр. 275-276.

<sup>2</sup> Дж. Бернал. Наука в истории общества. М., ИЛ, 1956, стр. 681.

Творческий работник в состоянии воспринять не более 10–15% информации, в которой содержатся полезные сведения, накопленные предшественниками и современниками. Это увеличивает процент случайного применения информации, снижает эффективность творческого труда<sup>1</sup>. Стало совершенно очевидным, что обобщение случайной, выборочной информации неправомерно.

Аналогичная ситуация сложилась в сейсмологии: резко увеличившийся информационный массив данных потребовал новых методов его освоения. Стало недостаточным обрабатывать только небольшую интуитивную выборку данных, а для полной их обработки потребовались ЭВМ.

Обработка сейсмограмм на ЭВМ позволила справиться с огромным потоком данных. Она дала возможность "получить истинное время пробега для всего спектра сейсмических волн (от 10 до  $4 \cdot 10^{-3}$  гц), автоматически определять координаты эпицентров, время в очаге и идентифицировать фазы. ЭВМ открыли новые возможности для анализа строения верхней мантии. Это относится к накоплению данных о региональных и локальных аномалиях во временах пробега и амплитудах наблюдаемых фаз, а также к использованию фаз, следующих за первыми вступлениями. С помощью ЭВМ оказалось возможным рассчитать времена пробега и амплитуды объемных волн, дисперсию поверхностных, периоды свободных колебаний, а также распространение в среде импульса и стационарных колебаний, и, таким образом, строить теоретические сейсмограммы для любой заданной модели строения Земли и очага землетрясения" (Ритсема, 1972).

Внедрение ЭВМ оказалось не просто сменой методов счета, но повлекло за собой качественный скачок в развитии сейсмологии мантии. Оно привело к коренным изменениям как в самой постановке обратных задач сейсмологии, так и в методах их решения (Яновская, 1972). Это послужило причиной новой трактовки результатов, нового осмысления модели мантии. Остановимся на этом подробнее.

### 3. Вероятностный, статистический характер представлений о мантии.

#### Построение стохастических моделей реальных сред

Работа по созданию новых методов решения обратной задачи сейсмологии началась в 60-е годы в Ленинградском отделении Математического института и в Институте физики Земли АН СССР.

Первыми по-новому сформулировали проблему решения обратной задачи сейсмологии Т.Б. Яновская (1963), Н.Н. Матвеева и А.С. Алексеев (1964). В частности, Яновская подчеркнула, что на практике обычно разыскивается один скоростной разрез. Вместе с тем определение скоростного разреза из годографа часто бывает неоднозначным и для нахождения единственного разреза в неявном виде вводятся гипотезы о строении среды и о данных наблюдений.

С введением ЭВМ возможен иной подход – сформулировать заранее необходимый минимум дополнительных гипотез и попытаться оконтурить область, содержащую скоростные разрезы, удовлетворяющие наблюдениям. Этот подход Яновская осуществила при определении области скоростных разрезов, удовлетворяющих годографу Леман для Европы (Lehmann, 1955). Перебрав методом Монте-Карло 2400 скоростных разрезов в некоторой заданной области значений, Яновская отобрала из них 115, для которых среднее квадратичное отклонение теоретического годографа первых вступлений продольных волн от соответствующего экспериментального годографа не превышало 1 сек.

Найденные разрезы лежали внутри определенной полосы (рис. 9), однако оставшаяся неоднозначность была весьма велика – не было ясно даже, существует ли волновод.

<sup>1</sup> Анализ тенденций и прогнозирование научно-технического прогресса. Киев, 1967, стр. 229.

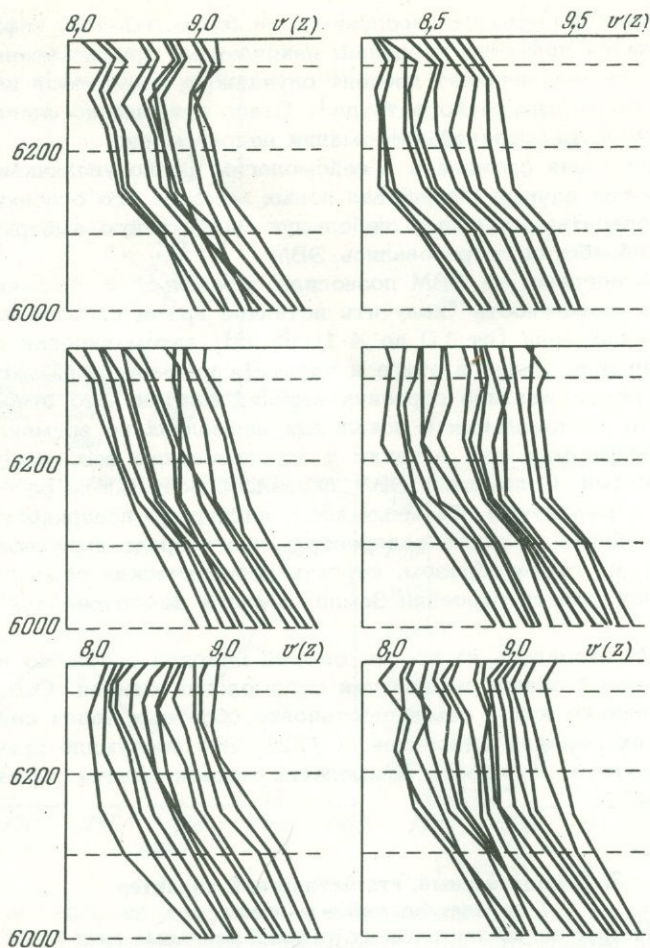


Рис. 9. Примеры вариантов разрезов, удовлетворяющих годографу Леман (Яновская, 1963)  
По оси абсцисс отложены скорости (в км/сек), по оси ординат – расстояния от центра Земли (в км)

Этот результат был в то время весьма неожиданным, хотя в дальнейшем было теоретически показано, что подобная неединственность – правило, а не исключение. Речь идет о работах советских сейсмологов М.Л. Гервера и В.М. Маркушевича (1967; Gerger, Markushevich, 1966). Авторы уяснили, что даже в идеальном случае, когда данные известны полностью и без ошибок, а принятая модель соответствует реальности, определение разреза по годографу при наличии волнового неоднородно. В реальном же случае эта множественность будет еще больше за счет ошибок в определении времени пробега и априорного упрощения структуры Земли. Кроме того, в реальном случае данные неполны.

Так возник принципиально новый – вероятностный – подход к интерпретации сейсмического материала. Если к концу 50-х годов в литературе обсуждалось несколько вариантов строения мантии, причем каждый автор полагал свой разрез наиболее полным приближением к истине, в самом крайнем случае равноценными считались два варианта (Буллен), то теперь, естественно, возникает задача охарактеризовать все множество возможных разрезов, удовлетворяющих наблюдениям. Причем каждый разрез – только одна из величин множества, допустимая с определенной степенью вероятности и в определенном доверительном интервале. Этот вероятностный подход закрепляется в последующих работах. Остановимся на них.

Обратная задача сейсмологии может решаться с помощью ЭВМ либо при интерпретации сейсмической записи или ее части как функции времени без выделения отдельных волн (Phinney, 1966), либо путем интерпретации тех или иных функций, характеризующих законы распределения отдельных волн (годографы, амплитудные кривые и т.д.).

Из-за большой теоретической трудности аналитического решения обратной задачи (подобно тому, как это делали в первой половине XX в.) вследствие чрезвычайной сложности реальной среды и из-за погрешностей эксперимента наиболее эффективными при численной интерпретации оказались методы перебора с помощью ЭВМ. В этих методах рассматривается большое число возможных решений, а ответом считается такая совокупность скоростных разрезов, для которых теоретические характеристики не слишком сильно отличаются от экспериментальных. Вертикальные разрезы ищутся двумя способами: методом инверсии и методом проб и ошибок.

Метод инверсии позволяет получить решение, преобразуя исходные данные: строится множество годографов, согласующихся с наблюдениями в пределах погрешности, затем каждый из них "обращается" в скоростной разрез. Примерами могут служить работы И.Я. Азбель, Т.Б. Яновской, В.И. Кейлиса-Борока, Л. Кнопова и др. (Азбель, Яновская, 1970; Keilis-Borok, Janovskaya, 1967; Knoroff, Teng, 1965). Л. Кнопов, например, аппроксимировал годограф последовательно усложняющейся функцией таким образом, чтобы разброс точек вокруг нее удовлетворял условию максимума функции правдоподобия. Затем для каждого годографа строился разрез. Эта работа показала, что, хотя вокруг искомого максимума не строилось доверительной области и, следовательно, набор годографов был неполным, область, занимаемая разрезами, оказалась довольно значительной.

Метод проб и ошибок разрабатывался в работах советских и зарубежных авторов (Матвеева, Алексеев, 1964; Федотов и др., 1964; Janovskaya, Asbel, 1964; Press, Beihler, 1964; Андрианова и др., 1965; Азбель и др., 1966; Asbel et al., 1966; Keilis-Borok, Janovskaya, 1967; Валюс, 1968; Матвеева, 1968; Азбель, 1968; Валюс и др., 1969, 1971).

В общем виде методика отыскания таких свойств среды, которые согласуются с заданными наблюдениями, описана в работах И.Я. Азбель и др. (1966), В.П. Валюса и др. (1969). Она заключается в отыскании разрезов, для которых минимальны меры расхождения между теоретическими и экспериментальными значениями волновых характеристик. Задача сводится к нахождению области минимума многомерной функции (расхождение расчетов и наблюдений) в пространстве неизвестных параметров разреза. На это уходит больше машинного времени, чем при методе инверсии, однако здесь нагляднее выступает зависимость характеристики волнового поля свойств скоростного разреза. Поиск минимума есть чисто вычислительная задача. Таким образом, решение сводится к определению множества разрезов, удовлетворяющих наблюдениям, и к установлению общих свойств этих разрезов.

Попытки применить метод перебора для построения скоростного разреза верхней мантии (так же, как и при методе инверсии) показали большую неоднозначность результатов. Например, И.Я. Азбель и Т.Б. Яновская (Janovskaya, Asbel, 1964) перебрали методом Монте-Карло 400 разрезов верхней мантии, соответствующих годографу первых вступлений  $S$ -волн, построенному для Северо-Восточной Америки (Lehmann, 1955). Из них лишь 21 разрез удовлетворял наблюдениям.

Развитие статистического, вероятностного отношения к результатам сказалось на развитии моделей реальных сред.

К концу 60-х годов интерпретация в рамках детерминированных моделей испытывала затруднения. Стрoение коры и мантии оказалось слишком сложным, многообразным и не укладывалось в рамки существовавших упрощенных представлений.

По остроумному замечанию А.В. Николаева, "природа быстро вступает в противоречие с идеализированными представлениями о ее состоянии и нередко выигрывает встречу с интерпретатором" (Николаев, 1973, стр. 165).

Чтобы удовлетворить современным требованиям сейсмологии, пришлось изменить основы подхода к теоретическому описанию сейсмических явлений. Это изменение происходит в направлении вероятностного отношения к среде: помимо описания полей в чрезвычайно сложных детерминированных средах, сейсмологи пытаются описывать их в простых, но вероятностных моделях. В частности, Г.И. Петрашень и Б.Я. Гельчинский отмечают, что "удается указать некоторые (не вполне еще формализованные) стохастические подходы как к теоретическому описанию распространения волн, так и к интерпретации сейсмических данных" (Петрашень, Гельчинский, 1969, стр. 28).

Таблица 4

Основные результаты определения  
коэффициента мутности,  $10^{-3} \text{ км}^{-1}$

Район	Кора	Мантия
Татарский пролив	2,5	1,5
Курильские о-ва	2,0	0,7
Западная часть Тихого океана	1,0	0,5
Черное море	1,5	0,35

Пионерами формализации этой задачи были Б.Я. Гельчинский (1968) и А.В. Николаев (1967 и др.). Б.Я. Гельчинский предложил так называемую Лю-модель (Гельчинский, 1968, 1970). Вместо очень сложной детерминированной модели вводится набор более простых стохастических моделей, эффективные параметры которых меняются по мере распространения волн. Эти изменения происходят случайным образом — многомерный вектор параметров блуждает в пространстве параметров подобно блуждению частиц в броуновском движении. Определение стохастических характеристик поля происходит с помощью математического аппарата, описывающего диффузионный  $n$ -мерный процесс. Эта модель, по определению И.Н. Галкина (1972, стр. 97), "логически непротиворечивая, содержит мало ограничений (допускаются разномасштабные неоднородности, сложные детерминированные поля и большие флуктуации скорости). Предстоит проверить ее применимость к сейсмическому эксперименту" (Галкин, 1972, стр. 97).

А.В. Николаев (1967, 1969, 1973) ввел понятие "сейсмически мутная среда". "Собственно говоря, мутность — это все те детали, которые вылезают за рамки детерминированной модели. Интерпретация наблюдений часто сталкивается с недостаточной полнотой экспериментальных данных, в результате чего приходится упрощать детерминированную модель, а "излишки" неоднородностей переносить в мутность" (Николаев, 1973, стр. 165).

Отдавая себе отчет в том, что излишняя простота представлений может вступить в противоречие с задачей исследований точно так же, как и излишняя сложность, Николаев пошел на это, исходя из того, что стохастическая модель — это расширение модели детерминированной. В 1967 г. он придал понятию "мутность среды" определенный количественный смысл (Николаев, 1967), введя понятие "коэффициент мутности" и разработав методику его определения, приспособленную к традиционной обработке характеристик волнового поля.

Экспериментальные исследования по данным ГСЗ (Галкин, Николаев, 1968; Николаев, Трегуб, 1969; Трегуб; 1969; Галкин и др., 1970; Galkin et al., 1972) и ультразвукового моделирования (Николаев, Аверьянов, 1970; Алешин, 1972) позволили установить основные черты флуктуаций волновых характеристик и их связь с флуктуациями скоростей сейсмических волн. Детальное изучение волнового поля, проведенное для исследования мутности, помогло увидеть ряд особенностей поля амплитуд и времен пробега, связанных с горизонтальной неоднородностью среды. Это позволило предложить достаточно

общие способы определения эффектов, связанных с неоднородностями разного масштаба (Николаев, Трегуб, 1969; Нерсесов и др., 1972), и в результате подметить некоторые закономерности распределения неоднородностей в мантии (табл. 4).

Из таблицы видно, что мантия "прозрачнее" коры и что в зоне перехода от Азиатского континента к Тихому океану кора и мантия становятся "прозрачнее" по мере удаления в океан (Галкин, Николаев, 1968; Николаев, 1973).

#### 4. Преодоление неопределенности представлений о мантии (детальные сейсмические исследования в отдельных регионах и комплексный подход к оценке сейсмических данных)

Итак, в 60-е годы в сейсмологии возникает ситуация, несколько похожая на положение в физике, когда выяснилось, что точно и полно описать реальность можно лишь статистически. Однако статистический подход вызывает такой же протест у геофизиков, как и у Эйнштейна, говорившего: "Я не верю, что господь бог играет в кости".

Физическое осмысление результатов приводит к заключению, что "полоса" имеет смысл, когда речь идет о Земле в целом, из-за горизонтальной неоднородности мантии; более точное приближение к действительности могут дать детальные исследования в пределах различных регионов (см. рис. 5).

Эту тенденцию одним из первых подметил Ю.В. Ризниченко, показавший, что современный этап геофизики характеризуется переходом от установления общих средних закономерностей в строении Земли к изучению ее локальных особенностей. Приобрели первостепенный интерес такие проблемы, как выявление геофизических различий строения коры и оболочки океанов и материков, платформ и геосинклиналей, изучение различий глубинного строения регионов. Этим закладываются научные основы лучшего понимания происхождения современного облика Земли и структуры ее недр. Он отмечает, что при все более интенсивном накоплении огромного материала наблюдений отпадает необходимость довольствоваться средними цифрами и ограничиваться их иллюзорной точностью (Ризниченко, 1961).

Примерами советских детальных сейсмических работ могут служить исследования А.А. Лукки и И.Л. Нерсесова в Памиро-Гиндукушской зоне, Р.З. Тараканова, С.А. Федотова, И.П. Кузина и др. в зоне перехода от Тихого океана к Азиатскому континенту.

Параллельно с развертыванием детальных исследований в тектонически различных регионах предпринимаются попытки устранить неоднозначность результатов для того или иного региона с помощью дальнейшего развития методов интерпретации. С этим связаны в частности начатые в СССР попытки комплексного количественного анализа данных.

Одной из первых работ этого направления была книга З.С. Андриановой и др. (1965), в которой авторы для выяснения строения мантии исследуют свойства поверхностных волн Лява.

Несколько отступив, скажем, что поверхностные волны стали широко использоваться для построения скоростного разреза мантии с 50-х годов (см. раздел о поверхностных волнах и волноводе); поиски совокупности разрезов, у которых расчетные характеристики поверхностных волн согласуются с наблюдениями в пределах точности измерений, начатые В.И. Кейлисом-Бороком с сотрудниками в 1964 г. (Андрианова и др., 1965), получили распространение в СССР и за рубежом (Валос, 1968, 1969; Keilis-Borok, Knoroff et al., 1969) и были приняты в качестве основного метода при построении международной модели верхней мантии (Keilis-Borok, Knoroff et al., 1969; in press).

Но вернемся к работе З.С. Андриановой и др. (1965), в которой авторы показали существенную неоднозначность применяемого метода интерпретации. Например, по первой (основной) гармонике для верхней мантии можно определить лишь среднюю скорость на больших (порядка сотен километров) интервалах глубин, причем волноводы останутся незамеченными.

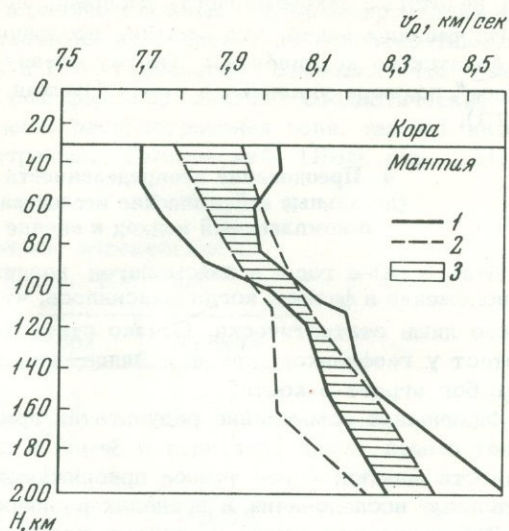
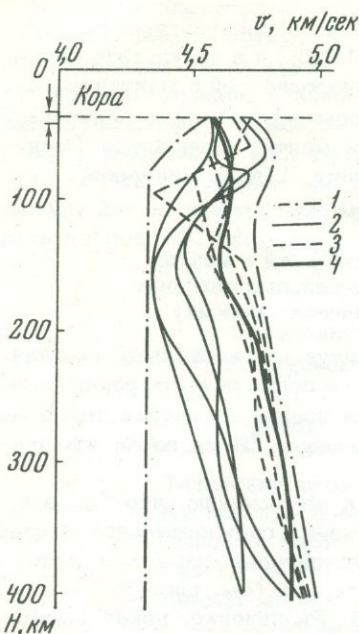


Рис. 10. Пример минимизации "полосы" скоростных разрезов для верхней мантии с помощью комплексирования сейсмических данных – постановка обратной задачи для верхней мантии (Андреанова и др., 1965).

1 – контуры области, в которой искались скоростные разрезы; 2 – разрезы, найденные по поперечным волнам; 3 – разрезы, найденные по волнам Лява; 4 – разрез, удовлетворяющий и поперечным волнам и волнам Лява.

Рис. 11. Пример сужения "полосы" скоростных разрезов для верхней мантии путем сопоставления разрезов, полученных разными способами (Федотов и др., 1964)

1 – области разрезов для Японии, Курил и прилегающей акватории, подсчитанные по методу Яновской (1963); 2 – аналогичные области, полученные по программе (Матвеева, Алексеев, 1964); 3 – общая область полос, рассчитанных в первом и втором вариантах машинных поисков

Способы преодоления этой неоднозначности и выявления деталей разреза сводятся к совместному использованию ряда гармоник (в соответственно подобранных интервалах частот) или к совместному использованию объемных и поверхностных волн. Взяв найденную Яновской полосу из 110 разрезов, соответствующих годографу Леман (Яновская, 1963), авторы сопоставили ее с полосой разрезов, согласующихся с дисперсионными кривыми Лява для трассы Невада-Нью-Йорк (Brun et al., 1960; Ewing et al., 1957). Из опубликованного в работе Андреановой и ее соавторов рисунка можно видеть, что в отдельности полосы разрезов довольно широки, а их пересечение достаточно узко, т.е. разрез, удовлетворяющий всей совокупности данных, определен почти однозначно, хотя, чтобы сделать заключение об его истинном характере, нужны еще дополнительные исследования (рис. 10).

Таким образом, стремление преодолеть вероятностный подход к оценке строения мантии рождает необходимость анализа комплекса сейсмических данных, т.е. получает право на жизнь комплексный подход.

Это видно и в последующих работах. В них анализируются годографы волн от чагов на разных глубинах (Матвеева, Алексеев, 1964 (рис. 11); Матвеева, 1966; Федотов и др., 1964), к интерпретации привлекаются не только первые вступления, но и последующие (Лукк, 1965), разрабатывается методика совместного количественного анализа амплитудных кривых и годо-

графов (Азбель и др., 1966; Asbel et al., 1966; Валюс, Галкин, Левшин, 1971); определяются скоростные разрезы, удовлетворяющие одновременно годографу, амплитудной кривой и дисперсии волн Лява (Валюс и др., 1971). Этот подход оказался довольно плодотворным. Например, И.Я. Азбель и ее соавторы (1966) разработали методику совместного использования годографа и амплитудных кривых рефрагированных волн  $P$  и применили ее к разрезу, практически совпадающему с разрезом Канадского щита (Брюн, Дорман, 1963). Рассчитанные для него годограф и амплитудная кривая принимались за "экспериментальные" и с ними сравнивались расчеты для разных моделей мантии. Эксперимент показал, что использование амплитудной кривой позволяет резко сузить область, в которой может располагаться разрез, даже если амплитудная кривая дана очень грубо. Вместе с тем для уточнения разреза мантии только по амплитудам необходимо построить детальные амплитудные кривые (зависимость  $A$  от расстояния до эпицентра и глубины очага) для волн разных периодов; расшифровать петли годографа, оценить "местные поправки" - влияния поверхностных слоев вблизи каждой станции. Для использования с этой целью только дисперсии поверхностных волн необходимо научиться разделять высшие гармоники (Левшин, 1964). Для уточнения годографов надо точнее находить положение гипоцентров и т.д. "Ради одной верхней мантии должен быть поднят уровень почти всех разделов сейсмологии" (Кейлис-Борок, 1968, стр. 319).

Однако, несмотря на явную продуктивность комплексного подхода, получить однозначность в построении скоростного разреза все-таки не удалось. Так, И.Я. Азбель (1969) определяла строение верхней мантии Средней Азии, используя в качестве экспериментальных данных годограф первых вступлений  $P$ -волн, полученный И.Л. Нерсесовым и Т.Г. Раутиан, и амплитудную кривую Л.Н. Малиновской. В результате получена модель мантии как с волноводом, так и без него.

Для преодоления этой неоднозначности разрабатывается общая схема решения обратной задачи сейсмологии (Keilis-Borok, Janovskaya, 1967). Программа, которая позволяет обрабатывать таким образом любую комбинацию сейсмических данных (годографы, амплитудные кривые, дисперсию, собственные колебания Земли), была составлена к 1968 г. (Валюс, 1968). В нее в качестве стандартных блоков вошли программы для решения прямых задач: расчета по заданному разрезу закономерностей распространения объемных (Яновская, 1966) и поверхностных (Андрианова и др., 1965; Нейгауз, Шкадинская, 1966) волн.

Примером ее практического использования могут служить работы В.П. Валюса, В.И. Кейлиса-Борока и А.Л. Левшина (1969, 1971), в которых авторы

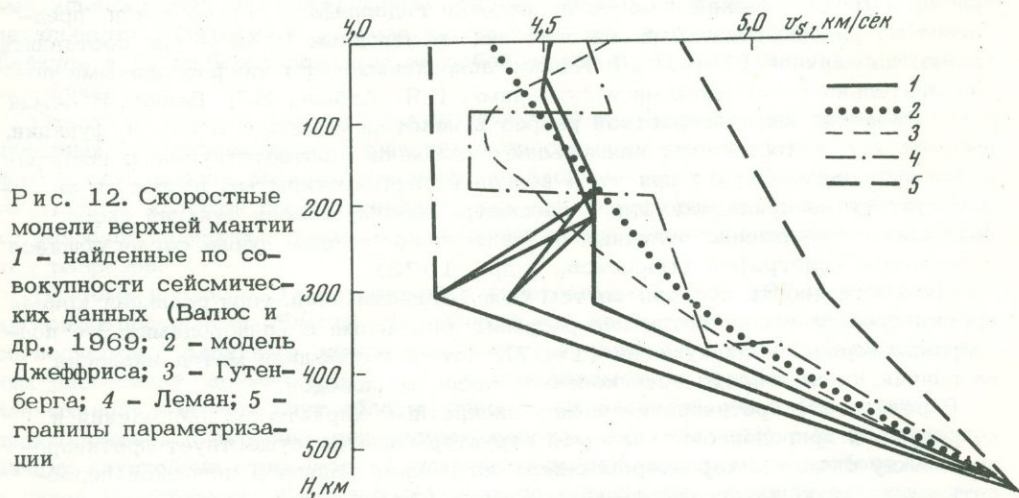


Рис. 12. Скоростные модели верхней мантии 1 - найденные по совокупности сейсмических данных (Валюс и др., 1969; 2 - модель Джеффриса; 3 - Гутенберга; 4 - Леман; 5 - границы параметризации

исследовали разрез  $S$ -волн для Европы, привлекая данные о годографах и амплитудных кривых объемных волн, а также дисперсионные кривые Лява и Релея.

Из 35 000 было отобрано 7 решений, удовлетворительно согласующихся со всей совокупностью данных. Интересно, что все они весьма отличаются от классических разрезов верхней мантии, т.е. из разрезов Джеффриса, Гутенберга и Леман ни один не удовлетворяет всей выбранной совокупности сейсмических данных (рис. 12).

Еще более перспективна совместная обработка совокупности сейсмических и других геофизических данных. Например, в диссертации Е.А. Любимовой (1966) показано, что разным разрезам мантии соответствуют большие различия в температуре, более того, некоторым из них соответствуют резко отрицательные температурные градиенты, неправдоподобные с точки зрения термике, и их сразу же можно отбросить. Разным разрезам соответствуют и неодинаковые плотности. "Совместная обработка сейсмических данных с термическими и гравитационными могла бы увеличить определенность всех трех групп параметров" (Кейлис-Борок, 1968).

Работы по комплексной интерпретации сейсмических данных стали развиваться и за рубежом (Press, Beihler, 1964; Press, 1968, 1970, 1970<sub>1</sub>; Wiggins, 1969, 1972), причем в интерпретацию были включены также и собственные колебания Земли, например, Ф.Пресс (Press, 1968) методом Монте-Карло перебрал  $5 \cdot 10^6$  разрезов Земли, представив ее состоящей из 88 однородных сферических слоев. Учитывались масса и момент инерции Земли, годографы первых вступлений различных видов объемных волн, собственные колебания Земли, наличие волноводов. Было получено около 10 решений, из которых выбрано одно (имеются два волновода продольных и поперечных волн и участок мантии, где плотность уменьшается с глубиной).

Таким образом реализуется на количественном уровне комплексный подход при сейсмических исследованиях верхней мантии, хотя, вообще говоря, наукам о Земле он был свойствен и ранее.

### **5. Преодоление противоречий между дискретным характером данных и непрерывным характером изучаемой структуры**

Казалось бы, машинный анализ сейсмических данных предоставил возможность воссоздать целостную картину внутреннего строения мантии. Однако это не так. Все прежние методы инверсии времен пробега предполагают знание непрерывного годографа (и он обращается методом Герглотца-Вихерта). Практически же эта кривая интерполируется между наблюдаемыми точками, а интерполяция всегда неединственна. Попытки улучшить ее предпринимались неоднократно. Г.Н. Бугаевский, вместо проведения годографа в облаке точек, предлагает аппроксимировать кривой значения производных (1957) или составлять кривую из звеньев (1960). Л. Кнопов аппроксимирует годограф разными последовательно усложняющимися функциями. И.Я. Азбель, В.П. Валюс, И.Леман и Г.Б.Яновская ищут скоростной разрез в некотором заданном классе функции, выбирая тот, который дает наименьшее отклонение соответствующего годографа от заданного. Однако при этом всегда остается открытым вопрос, а не существует ли не принадлежащий к рассматриваемому классу функций скоростной разрез, совершенно отличный от найденного, но еще лучше согласующийся с заданным годографом (Бессонова и др., 1973).

Множественность становится тем более существенной, если реальная кривая времен пробега имеет петли или разрывы, связанные с волноводами. Это подтвердили Гервер и Маркушевич (1967), которые обобщили метод инверсии на случай, если в среде есть конечное число волноводов.

В результате противоречия между дискретным характером наблюдений и непрерывной природой отыскиваемой структуры всегда существует противоречие между сложным характером сейсмологической записи и попыткой подобрать адекватную детерминированную модель (Keilis-Borok, 1971). Это про-

творечие образно описал И.Н. Галкин, показавший, что желание добиться лучшего соответствия с наблюдениями путем усложнения детерминированной модели приводит к уменьшению точности определения слишком большого числа параметров среды. Предельная детальность обозначает знание "ничего обо всем". Наоборот, предельное упрощение модели соответствует знанию "всего ни о чем". Между детальностью и точностью интерпретации существует соотношение подставить принципу неопределенности квантовой физики (Галкин, 1970, стр. 96).

Осознание этого противоречия, т.е. понимание того, что мантия - система с огромным (практически бесконечным) количеством элементов и связей между этими элементами, а ее модель - система элементов, определяемая детальностью и точностью данных и находящаяся в определенных соотношениях с первой, привело к сознанию, что прямая автоматизация традиционного подхода к обработке информации может скорее разрушить остатки целостности представлений о мантии, чем восстановить ее.

Традиционные методы в сейсмологии сконструированы таким образом, чтобы по необходимости сокращать вычисления посредством ограничения цели, что достигается сужением выборки данных и введением априорных гипотез (исследуются не все элементы и не все связи). Эффективность этих методов в значительной степени зависела от интуиции и здравого смысла при выборе указанных ограничений и при оценке результатов (прекрасным примером тому могут служить работы Голицына, Гутенберга). При автоматизации ограниченных методов обработки информации возникает поток новых результатов и в то же самое время уменьшается их ценность, поскольку интуиция и здравый смысл не возрастают так быстро, как вычислительные возможности.

Поэтому перед вычислительной сейсмологией встала задача - сначала обобщить методы, а уже затем сделать их более строгими. Один путь обобщения заключается в том, чтобы все релевантные данные обрабатывались совместно. Но этого недостаточно. Второй путь дальнейшего развития методов интерпретации связан с детальной статистической оценкой результатов: с точностью обработки задачи, с вопросами единственности и устойчивости решения, доверительных интервалов результатов и т.д.

Задачу, заключающуюся в том, какие свойства моделей Земли могут быть единственным способом определены из данной совокупности дискретных наблюдаемых точек для случая линейной дискретной аппроксимации, первыми решили американские сейсмологи Г. Бейкус и Ф. Джилберт (Backus, Gilbert, 1967). Они отказались от интерполяции данных и по совокупности наблюдаемых точек, основываясь не на предположении, что функция скорости от глубины аппроксимируется линейно по опорным разрезам, находят область, содержащую разрезы, близкие к опорному в определенных пределах. Количество экспериментальных точек на определенном эпицентральной расстоянии задает степень детальности получаемого разреза на определенном интервале глубин. Работа Бейкуса и Джилберта повлекла за собой десятки работ, выполненных по этой методике.

Однако указанные авторы каждую точку наблюдаемых данных трактуют как линейный функционал на пространстве скоростных разрезов. А это несправедливо в случае волновода. Кроме того, необходимость отталкиваться от опорного разреза, который рассматривается как начальное приближение, поиск только разрезов, близких к нему, ограничивают выбор области возможных скоростных разрезов.

Поэтому в работе Э. Бессоновой с соавторами (1973, 1974) разработан алгоритм построения области, содержащей все скоростные разрезы, которые согласуются с заданным дискретным набором точно определенных эпицентральных расстояний, времен пробега и лучевых параметров отраженных и преломленных волн. Авторы ищут область скоростных разрезов, не делая никаких предположений о строении скоростного разреза. Но найденный ими метод по началу неустойчив относительно ошибок в определении времени пробега волн и лучевого параметра. На следующем этапе работы они исходят из дискрет-

ного набора времен пробега, известных и неизвестных лучевых параметров (что характерно при ГСЗ). По этой совокупности данных ищется область разброса скоростных значений в предположении горизонтально однородной среды, т.е. исходя из того, что скорость распространения сейсмических волн зависит только от глубины и подчиняется лишь законам геометрической оптики при одном предположении, что на границе волновода скорость ограничена константой.

Применение этого метода к выяснению строения коры в хорошо изученном районе показало, что результаты согласуются с уже имеющимися представлениями, во многом дополняя и уточняя их. Основное достоинство этого метода — надежность и независимость от априорных гипотез.

## **6. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К ИЗУЧЕНИЮ МАНТИИ — УТОЧНЕНИЕ ОБЩИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ В СТРОЕНИИ МАНТИИ И ИХ КОНКРЕТИЗАЦИЯ В РАЗЛИЧНЫХ РЕГИОНАХ**

Осуществление международных геофизических проектов и проведение вследствие этого детальных сейсмических исследований коры и мантии, а также новый подход, применяемый при интерпретации получаемых данных, привели к более четкому осознанию общих закономерностей в строении мантии и их конкретного проявления в тектонически различных районах. В ряде работ можно найти подробные обзоры этих результатов ("Земная кора и верхняя мантия", 1972; Рябой, Старобинец, 1973, 1974; и др.). В связи с этим, никоим образом не претендуя на полноту изложения и на равную степень детальности в освещении данных по разным районам, приведем лишь краткие сведения, которые могли бы послужить иллюстрацией того, как уточняются общие закономерности в строении мантии и как они конкретно проявляются в том или ином регионе.

Америка и Канада. Первые же работы по изучению времен пробега продольных волн показали (Romney et al., 1962), что экспериментальные годографы в различных районах весьма отличаются от стационарного годографа Джеффриса-Буллена, причем как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения скоростей волн. Это свидетельствует о значительных горизонтальных неоднородностях в верхней мантии.

Это же подтверждают и многочисленные независимые данные, например: анализ записей более 100 станций, регистрировавших в Северной Америке ядерный взрыв "Гном" (Herpin, Taggart, 1962); составленная Э.Херриным и Дж.Таггартом и опубликованная Д.Джеймсом и Дж.Штейнхартом в их сводке по ГСЗ в Северной Америке (James, Steinhart, 1966) карта скоростей  $P$ ; сводка работ зарубежных ученых о строении верхней мантии (Рябой, Старобинец, 1974) и др.

Л. Пекайзер и Дж. Штейнхарт установили, что скорости продольных волн в мантии вулканических областей меньше 8,0 км/сек, а под стабильной континентальной и нормальной океанической корой они несколько больше этой величины (Pakiser, Steinhart, 1964). В связи с этим высокие горы Запада США они рассматривали как изостатически уравновешенные низкоскоростной и низкоплотной мантией, подстилающей аномально тонкую кору (Pakiser, 1969). Работа Пекайзера и Штейнхарта (Pakiser, Steinhart, 1964) была практически первой, где высказывалась мысль о наличии двух подкоровых провинций в Северной Америке. Авторы полагали, что линия, разделяющая эти провинции, проходит вдоль форланда Скалистых гор. Исследования последних лет подтвердили это предположение. Например, сопоставление вариаций времен пробега продольных волн, проникающих в мантию, с наиболее поздним годографом (Херрин, 1972) показало (Рябой, Старобинец, 1974), что в США выделяются две области, существенно различающиеся по строению верхней мантии: западная — низкоскоростная и восточная — высокоскоростная. О том же свидетельствует изменение амплитуд "мантийных" волн, возникающих при ядерных

взрывах (там же). Было показано, что западная провинция характеризуется высокими значениями теплового потока и высокой тектонической активностью, восточная же тектонически стабильна и отличается низкими значениями теплового потока ("Земная кора и верхняя мантия", 1972). Практически к концу 60-х - началу 70-х годов уже не осталось сомнений в том, что наиболее низкие сейсмические скорости в верхах мантии совпадают с областями современной тектонической активности, а наиболее высокие - со стабильными частями континента.

Там, где кора более мощная, подстилающие ее породы имеют высокую сейсмическую скорость, а там, где она тоньше, для пород мантии характерны пониженные скорости. Иными словами, изостатическое равновесие больших регионов устанавливается путем изменения мощности коры и соответствующего изменения плотности в верхах мантии (Brun, 1966; Хили, 1969; Хили, Уоррен, 1972; и др.).

В Канаде при изучении результатов регистрации преломленных волн от взрывов и поверхностных волн от землетрясений также выделено пять зон, различающихся по строению верхней мантии: западная, восточная, северная, южная и Канадский щит (Wickens, 1971).

Анализ вариаций времен пробега продольных волн, проникающих в мантию под территорией США и Канады, показал, что с глубиной горизонтальная неоднородность мантии уменьшается (Рябой, Старобинец, 1974). Это не исключает, однако, того, что выделенные низко- и высокоскоростные мантийные зоны простираются в глубь мантии на сотни километров. Например, протяженные сейсмические профили, построенные методом преломленных волн на озере Верхнем, дают региональные отличия в структуре верхней мантии до глубин 400 км (Хили, 1969), а М. Чиннери и М. Токсоз (Chinnery, Toksöz, 1967) допускают региональные вариации выделенной ими в мантии (при записях землетрясений в штате Монтана) границы на глубине около 900 км, которую они считают подошвой верхней мантии.

Выводы, сделанные на основе анализа вариаций времен пробега "мантийных" волн в Северной Америке, подтверждаются и другими данными. Изучение граничных скоростей (объемных и поверхностных волн) в мантии США и Канады (Берри, 1969; Вагг, 1968; Brun, 1966; Hall, Najnal, 1969) и докритических волн, отраженных от границы раздела в мантии (Hoffman et al., 1961), а также новые методы интерпретации глубинных сейсмических исследований, в частности использование неоднородных в вертикальном и горизонтальном направлении скоростных моделей строения среды (Wesson, 1971; Mergey, 1969; Jасoub et al., 1970) и сопоставление их с экспериментом, свидетельствуют о значительных горизонтальных неоднородностях верхней мантии, особенно до глубин 150-200 км ниже подошвы коры (Рябой, Старобинец, 1974).

Неоднородность верхней мантии весьма основательно сказывается на строении и расположении слоя пониженных скоростей. В Америке в результате интерпретации ядерных взрывов (Roller, Jackson, 1966) и землетрясений (Carder et al., 1966) сравнительно низкие скорости продольных волн установлены на глубинах не менее, чем 150-200 км от подошвы коры, хотя в ряде случаев понижение скорости начинается сразу от границы Мохоровичича. Значение скоростей продольных волн в волноводе в среднем варьируют, по разным оценкам, от 7,2-7,4 до 7,6-7,7 км/сек, его мощность - от 100 до 200 км, а глубина кровли - от 50 до 100 км под поверхностью Мохоровичича. Данные ядерных взрывов на полигоне в Неваде показывают, что волновод продольных волн (со скоростью 7 км/сек) в этом районе существует на глубинах 104-156 км (Green, Hales, 1968). На восток от Скалистых гор, в сторону провинции Больших равнин, глубина волновода уменьшается (вероятно, до полного его выклинивания). Сейсмические записи при регистрации взрывов на озере Верхнем свидетельствуют о том, что в центральных и северо-восточных районах США отчетливо выраженная астеносфера отсутствует, а значения скоростей больше, чем в западных районах (Green, Hales, 1968; Хили, 1969). Здесь в мантии на глубинах 70, 125, 380 и 450 км выделе-

ны границы быстрого увеличения скоростей продольных волн, а на некоторых из них увеличиваются и скорости поперечных волн. Вообще же глубины границ раздела в мантии, лежащие ниже волновода, по данным различных авторов, довольно сильно варьируют (Carder, Bailey, 1958; Hoffman et al., 1961; Chinnery, Toksöz, 1967; и др.).

Что касается положения астеносферы для продольных волн в Канаде, то этот слой ( $v_p \sim 7,8$  км/сек) отчетливо выражен в западной зоне, в диапазоне глубин 50–90 км и даже более; на Аляске его кровля "поднимается" до 45 км (Vesanen et al., 1959). В восточных же и южных районах Канады, наоборот, на глубинах, лежащих на 20–80 км ниже земной коры, скорость резко растет до 8,4–8,5 км/сек, и лишь в некоторых случаях непосредственно ниже коры можно предположить зону слабых отрицательных градиентов скорости. Аналогичная картина отмечается и в ряде районов США (Hales et al., 1970).

Поперечные волны не на всех глубинах ведут себя так же, как продольные, например, в мантии под США в диапазоне глубин 125–200 км для поперечных волн четко выделяется слой пониженных скоростей, причем интересно, что для продольных волн граница 125 км интерпретируется как граница роста скорости. Поведение продольных волн ниже этой границы вызывает дискуссии. Так, Б. Леви и Р. Мейер считают, что для нескольких больших глубин характерны слабо-отрицательные градиенты скоростей продольных волн. Хотя они недостаточны для образования зоны тени, но вполне достаточны, по мнению этих авторов, для объяснения незначительной интенсивности волн на удалениях 900–1000 км от источника (Lewis, Meyer, 1968).

Кроме проведения детальных исследований в отдельных районах, ведется работа по обобщению этих данных. Так, обобщение сейсмических записей поперечных волн от землетрясений дало возможность составить средний для США скоростной разрез этих волн в верхней мантии (Ibrahim, Nuttli, 1969). Он характеризуется отчетливо выраженным слоем пониженной скорости на глубинах 150–200 км и менее выраженными слоями на глубинах 340–370 и 670–720 км. Это не исключает того, что в отдельных районах эти глубины могут сильно меняться. Так, в районе Бассейнов и Хребтов непосредственно под корой обнаружен слой толщиной около 9 км со скоростью 4,5 км/сек, покрывающий очень низкоскоростную среду. Возможно, что волновод поднимается здесь к подошве коры (Kovach, Robinson, 1969).

Обобщение материалов по дисперсии поверхностных волн позволило составить для значительной части территории США карту низкоскоростного канала и установить связь региональных особенностей его строения с изменением температурного режима и природой регионов (Kporoff, 1969). Наиболее резкие границы раздела выделены в диапазонах глубин приблизительно 300–400 и 600–700 км (глубина их и перепад скоростей на них очень сильно изменяются от района к району).

В Канаде также почти повсеместно определен слой пониженных скоростей для поперечных волн ( $v_s < 4,61$  км/сек). Его толщина и глубина залегания сильно меняются. Причем кровля выделена более точно, чем подошва. Глубина залегания кровли называется подошвой литосферы, на западе Канады она практически совпадает с подошвой коры. В США и Канаде ведется также большая теоретическая работа по уточнению стандартной модели строения Земли. Под руководством Э. Херрина группа сейсмологов, статистически обработав обширные материалы о временах пробега объемных волн в разных районах земного шара (при взрывах и землетрясениях), выработала стандартный годограф (Negglin et al., 1968). Он значительно лучше соответствует современным данным, чем годограф Джеффриса–Буллена 1940 г. Скоростная модель Херрина несколько отличается и от модели Джеффриса, и от модели Гутенберга. По Херрину, толщина коры  $\sim 40$  км, скорости  $v_p$  растут от 6 до 7,75 км/сек и на границе Мохоровичича скачком увеличиваются до 8,05 км/сек. В верхней мантии они несколько выше, чем по Джеффрису и Гутенбергу. Астеносфера не выделена.

Обобщенный скоростной разрез Земли методом перебора моделей с учетом сейсмических, геотермических, геомагнитных и других данных построил Ф.Пресс, о чем подробнее сообщается в разделе об интерпретации данных.

Кроме того, амплитудные характеристики глубинных волн широко используются для изучения неупругого поглощения энергии сейсмических волн (добротности среды), а скоростные параметры — для определения плотности и коэффициента Пуассона. Изучение этих параметров весьма важно для понимания вещественного состава мантии и термодинамических условий в ней. Однако в данной работе на вопросах выяснения вещественного состава и физического состояния мантии, а также ее взаимодействия с корой мы останавливаться не будем.

В Южной Америке объем сейсмических исследований значительно меньше, чем в США и Канаде. Один из наиболее интересных результатов получен при регистрации продольных волн от взрывов и поверхностных волн Релея и Лява от землетрясений в южных районах Боливии и Перу и в северных районах Чили (James, 1971). Установлено, что под Андами поверхность Мохоровичича опускается до 70 км, а верхняя мантия сходна по строению с мантией западных районов США. Здесь для поперечных волн выделяется астеносфера, глубина кровли которой от 50 км в океане опускается до 110 км под Андами (в этом же направлении уменьшается и отрицательный скачок скоростей по поверхности волновода). Этот результат неплохо согласуется с сейсмологическими данными. Е. Весанен и др. (Vesänen et al., 1959) оценивают глубину волновода в Южной Америке приблизительно в 120 км.

Исследования мантии в Европе, как и на Американском континенте, свидетельствуют о существенных региональных различиях в ее строении.

Западная и Центральная Европа, изученная в основном с помощью сейсмологии взрывов, характеризуется "нормальными" значениями скоростей сейсмических волн (8,0–8,2 км/сек), в некоторых районах ФРГ они выше; самые высокие значения скоростей волн на подошве коры характерны для отдельных районов Финляндии, Швеции и Норвегии. Пониженные же значения отмечены в некоторых районах ФРГ (Рейнский грабен), Франции (Центральный массив), Финляндии (восточное побережье Ботнического залива) и др. В пределах Рейнского грабена ниже границы Мохоровичича ( $v_p = 7,6-7,7$  км/сек) выделена еще одна граница роста сейсмических скоростей ( $v_p = 8,2$  км/сек). Аналогичная зона перехода от коры к мантии выделена в предгорьях Судет.

Северные районы Европы изучены по годографам продольных волн, возникших от Гельголандского взрыва (Mintrop, 1949) и от землетрясений с эпицентрами в Норвежском море и Северном Ледовитом океане (Kenestrom, 1971), а также по данным регистрации поверхностных волн в Финляндии (Noponen et al., 1969). Все эти данные свидетельствуют о сравнительно высоких значениях скоростей так называемых мантийных волн в Северной Европе и об отсутствии здесь четко выраженного астеносферного канала большой мощности. Напротив, на глубинах 60–110 км отмечена зона очень слабого возрастания скоростей, а на Балтийском шите, на 28 км ниже подошвы коры, предполагается существование границы, на которой скорости продольных и поперечных волн возрастают на 0,2–0,3 км/сек — до значений 8,80 и 4,79 км/сек соответственно (Noponen et al., 1967–1969; Kenestrom, 1971).

Центральные и южные районы Европы характеризуются (по данным самых различных сейсмических исследований, с использованием самых различных методов) зоной пониженных скоростей (Рябой, Старобинец, 1974). Более того, детальные исследования годографов объемных волн и их амплитудных характеристик позволили уверенно выделить даже не один, а по крайней мере два волновода (Ansorge, Mayer-Rosa, 1968). Это подтверждается тем (Müller, Mayer-Rosa, 1971), что при расчете синтетических сейсмограмм для различных моделей верхней мантии (без волновода, с одним, с двумя волноводами) и при сравнении их с реальными записями наилучшее совпадение теоретических и экспериментальных данных получается для модели верхней мантии с двумя волноводами.

Южная и Юго-Восточная Европа отличается большой "пестротой" данных. В ряде районов отмечено полиастеносферное строение мантии.

Карпатская складчатая система, по наиболее детальным данным (Сагалова, 1973), характеризуется чередованием зон пониженных и повышенных скоростей. Возрастание скоростей на разных глубинах происходит неравномерно: наиболее высокий вертикальный градиент продольных волн отмечен на глубинах 120-140 и 170-180 км, поперечных - на глубине 120-140 км. От поверхности Мохоровичича до глубины около 100 км отмечен волновод продольных волн, а для поперечных выделяется три волновода с осевыми линиями на глубинах 100, 120 и 150 км. Эти данные несколько отличаются по величинам скоростей и глубинам волноводов от менее детальных определений, сделанных ранее (Матвеева, Алексеев, 1964; Иосиф, 1964; Iosif, 1965). Верхняя мантия района Вранча характеризуется слоистым строением (перепадом скоростей с глубиной) и наличием волновода в интервале глубин 100-150 км (Ванек, 1972; Иосиф, 1964; Iosif, 1965<sub>1</sub>; Enescu și alt., 1972; Сагалова, 1973).

По данным итальянских сейсмологов (Bossolasco, Claudio, 1969), в верхней мантии выделены три границы разрыва скоростей, расположенные в диапазонах глубин приблизительно 100-120 км (8,44 км/сек); 160-180 км (8,68 км/сек) и 300-340 км (10,36 км/сек). Между двумя верхними границами предполагается слой пониженных скоростей. В предгорьях Альп обнаружен слой мощностью 30 км с промежуточными скоростями (~7,5-8 км/сек) и два слоя пониженных скоростей. Первый расположен от 70 до 100 км и отделен от второго высокоскоростной зоной (Кпорoff et al., 1966). В Центральной Франции (Choudhury, Perrier, 1966; Pho, Hirn, 1970) обнаружен слой пониженных скоростей на глубинах 120-130 км, он "поднимается" к поверхности Мохоровичича в районе Форез.

Многочисленные сейсмические исследования с помощью поверхностных волн в Альпах (Кпорoff et al., 1966); на западе Средиземного моря (Berry, Кпорoff, 1967); на нескольких профилях, секущих континентальную часть Западной Европы в разных направлениях (Seidl, Mueller, 1970; Seidl et al., 1971), а также сопоставление поверхностных и объемных S-волн (Валюс и др., 1969) свидетельствуют о том, что, хотя в мантии почти повсеместно существует слой пониженных скоростей, но его глубина, мощность и значение скоростей сейсмических волн в нем (а следовательно и физическое состояние вещества) весьма существенно меняются от района к району. На профилях Штутгарт-Страсбург и Штутгарт-Безансон, пересекающих Центральную Европу (и, в частности, рифтовую зону Рейнского грабена), волновод выделен в диапазоне глубин 80-220 км ( $v_p \sim 4,3$  км/сек), а на профиле, пересекающем Европу от Испании до Дании, подошва его погружается до 280 км (хотя также  $v_p \sim 4,3$  км/сек).

Под Альпами глубины волновода 80-220 км (а скорости значительно ниже  $v_p \sim 4,10-4,15$  км/сек). К средиземноморскому побережью Франции и о-вам Сардиния и Корсика поверхность астеносферы погружается от 50 до 100 км, мощность ее увеличивается от 140 до 160 км, а скорость растет до 4,45 км/сек (Choudhury et al., 1968). Сейсмические исследования в различных районах Средиземного моря с использованием записей объемных и поверхностных волн свидетельствуют о том, что в Средиземном море также колеблется глубина, толщина волновода и скорость распространения в нем сейсмических волн (Berry, Кпорoff, 1967; Раю, 1969).

Кроме выяснения строения волновода, существенным достижением сейсмологии можно считать уточнение ряда границ и мантии на глубинах, больших 150-200 км. Во-первых, это граница, залегающая в Центральной Европе на глубинах 210-220 км ( $v_p$  растет скачком на 0,3-0,5 км/сек), которую отождествляют с подошвой астеносферы. От нее зарегистрированы отраженные и преломленные докритические волны. Кроме того, выделены еще по крайней мере две границы в интервалах глубин 300-400 и 500-600 км. Их глубина, а также характер изменения на них скоростей весьма варьируют. Так, во Франции со-

ставлена схема изменения глубины раздела в мантии, на которой скорости продольных волн  $v_p$  меняются от 9,3 до 10,2 км/сек (Mechler et al., 1971). Эта граница от 520–550 км в северных и восточных районах Франции "ныряет" на глубину 750 км под Пиринеями, и к югу от них, под Альпами, она не выделена, а в пограничных с Францией районах ФРГ ее глубина ~ 550 км (Ansorge, Mayer-Rosa, 1970).

СССР. Представление о строении мантии под территорией СССР дает обобщение результатов сейсмических исследований, наиболее широко развернувшихся в нашей стране после начала работ по проекту "Верхняя мантия" (Беляевский, 1970; Беляевский, Вольвовский, 1969; Беляевский, Рябой, 1969; Вольвовский, 1973<sub>1</sub>; Вольвовский, Вольвовский, 1975; Деменицкая, 1967, 1969; Рябой, Старобинец, 1973).

Анализ результатов ГСЗ и детальных сейсмологических наблюдений дал возможность составить карты граничных скоростей сейсмических волн на поверхности Мохоровичича (Беляевский, Рябой, 1969; Беляевский, 1970; Беляевский, Вольвовский, 1969; Вольвовский, 1973<sub>1</sub>; Рябой, Старобинец, 1973), свидетельствующие о скоростях продольных волн в самой верхней толще мантии — мощностью в несколько километров. Скорости эти меняются в широких пределах — от 7,5–7,8 до 8,4–8,6 км/сек. Характер их распределения по площади вскрывает региональные неоднородности мантии, связанные с крупными элементами геологической структуры, хотя связь эта весьма сложная.

Шиты, как и Канадский, характеризуются широкими пределами изменения скоростей. Так, на Балтийском шите скорости меняются от 7,9–8,0 км/сек к югу от Ботнического залива до 8,4–8,6 км/сек к северу от него. Преобладающие значения скоростей (8,2–8,3 км/сек) здесь близки к преобладающим значениям на Канадском шите (8,3–8,4 км/сек). Древние платформы Евразии, как и Северо-Американская платформа, характеризуется изменениями преобладающих скоростей от 8,1–8,2 до 8,3–8,5 км/сек. Области молодых тектонических деформаций (Карпаты, Памир, Гиндукуш, Тянь-Шань, Урал) характеризуются пониженными значениями скоростей (7,8–8,0 км/сек), как и области молодых тектонических деформаций Калифорнической рифтовой зоны и провинции Бассейнов и Хребтов в пределах Скалистых гор (7,5–7,9 км/сек) (Рябой, Старобинец, 1973).

Еще более низкие значения скоростей отмечаются на поверхности мантии в Байкальской рифтовой зоне (7,7–7,8 км/сек) (Зорин, 1971; Зорин, Новоселова, 1974). Низкоскоростная зона, шириной 200 км, захватывающая Байкальский рифт и прилегающие с юго-востока районы Забайкалья, оконтуривается Сибирской платформой, от которой она отделена глубинным разломом, и участками Забайкалья с нормальными значениями скоростей (8,1–8,2 км/сек) (Косминская, 1968; Крылов и др., 1969). Низкоростная зона как бы рассекает крупные геологические структуры древнего возраста. Это дает возможность предположить, что она связана с процессами рифтогенеза (Крылов, 1971). Отметим, что пониженными скоростями характеризуются и Рейнский грабен, имеющий типично рифтовое строение.

Закономерности распределения граничных скоростей в пределах западных районов СССР, Казахстана, Средней Азии, Сибири и в пределах зоны перехода к Тихому океану неодинаковы, что соответствует различию типов и направленности тектонических процессов.

В области перехода от Азиатского континента к Тихому океану выявляется связь между сейсмическими скоростями на границе Мохоровичича и главными элементами геологической структуры. Тихоокеанская плита и, видимо, часть Берингова моря характеризуется высокими мантийными скоростями (8,3–8,7 км/сек), глубоководные желоба — промежуточными (8,0–8,2 км/сек), а островные дуги с активной вулканической деятельностью и повышенной сейсмичностью — пониженными (7,5–8,0 км/сек) (Рябой, Старобинец, 1973).

При проведении ГСЗ на территории СССР установлена вертикальная расчлененность верхней мантии (Антоненко, Дубровин, 1967; Антоненко, Попов, 1969; Беляевский, 1970; Беляевский, Вольвовский, Рябой, 1971; Литвиненко, 1965;

Померанцева, 1966; Померанцева, Мозженко и др., 1965; 1967; Рябой, 1966<sub>1</sub>; Тарков, Чамо и др., 1972; Туезов и др., 1969; Халевин и др., 1970; Чамо и др., 1971; и др.).

Изучая экспериментальный материал по обменным волнам в Туркмении в 1957–1961 гг., Н.К. Булин показал, что строение верхов мантии в интервале 10–20 км ниже подошвы коры в разных районах Туркмении характеризуется разной степенью дифференциации. Он пришел к выводу, что более высокая степень расслоенности верхов мантии соответствует более подвижным участкам земной коры (Булин, 1963, 1967), хотя впоследствии для более глубоких горизонтов он высказал иное мнение (Булин, Афанасьева, Проняева, Эрглис, 1974).

О строении более глубоких горизонтов дают представление скоростные разрезы верхней мантии до глубины 80–100 км на суше и 25–35 км на море, построенные в самое последнее время по годографам первых вступлений волн, преломленных на границе Мохоровичича во время ГСЗ, проводимого в различных районах нашей страны (Рябой, Старобинец, 1963; Беляевский, 1970).

Профили ГСЗ были расположены в пределах таких различных тектонических структур, как Балтийский щит (Литвиненко, 1967, 1968), Воронежский массив и прилегающие районы Русской платформы (Померанцева и др., 1965, 1967 и др.), Скифско-Туранская плита (Рябой, 1966), Казахская складчатая область, Предуральский краевой прогиб и западная окраина Уральской складчатой системы (Халевин, 1968, 1970), центральная часть Черноморской впадины (Непрочнов и др., 1969–1972), западная котловина Тихого океана (Зверев, 1969, 1970; и др.).

Анализ этих данных показал, что верхняя мантия в исследованном диапазоне глубин характеризуется значительной скоростной неоднородностью как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении. Значения скоростей распространения продольных волн в верхней мантии от ее подошвы до глубины 80–100 км на суше и 25–35 км на Черном море и в Тихом океане меняются от 7,6–7,8 до 8,6–8,8 км/сек. Минимальные размеры горизонтальных неоднородностей не превышают первых десятков километров. При переходе из одного района в другой изменяются и значения скоростей, и характер их распределения с глубиной (Рябой, Старобинец, 1973).

В некоторых районах СССР на глубинах менее 80–100 км выделены слои с пониженными скоростями мощностью 10–15 км, которые ранее в Советском Союзе на такой глубине обнаружить не удавалось (Рябой, Матвеева, Разинкова, 1969). Однако зарубежные исследователи выделяли аналогичные слои в верхней части мантии Западной Европы и Северной Америки (Ansorge, Mayer-Rosa, 1970; Ansorge, Mueller, 1971; Maeyer-Rosa, Mueller, 1973; Him, Steinmetz et al., 1973).

Крупномасштабные неоднородности мантии, размеры которых значительно превышают длину волны, изменяются в пространстве сравнительно медленно и определяются в результате интерпретации детерминированной компоненты волнового поля. Кроме того, в реальных средах существуют мелкомасштабные неоднородности, вызывающие пространственно неустойчивые изменения характеристик волнового поля: флуктуации времен пробега, амплитуд, искажение формы сейсмических импульсов и др. В работах А.В. Николаева, как мы уже говорили, предложен метод определения нового сейсмического параметра – коэффициента мутности, характеризующего рассеяние энергии сейсмических волн на мелких неоднородностях (Николаев, 1972; Галкин, 1972; и др.).

Представление о строении верхней мантии на глубинах 200–900 км дают сейсмологические исследования.

Наиболее детальные результаты сейсмологических исследований верхней мантии получены для Карпатской складчатой системы (Сагалова, 1973), Памиро-Гиндукушской зоны, на сейсмологическом профиле Памир-Байкал (Лукк, Нерсесов, 1965 и др.), на Курило-Камчатской островной дуге (Тараканов, 1965; Тараканов, Левый, 1967; Федотов и др., 1964; Федотов, Славина,

1968). В этих эпицентральных зонах находится достаточно плотная сеть постоянно действующих и передвижных сейсмологических станций, что позволило регистрировать здесь прямые волны от распределенных по глубине источников.

Значительно менее детальные и точные скоростные разрезы верхней мантии построены для Балтийского шита, Кавказской складчатой системы, восточных районов Туранской плиты, зоны перехода к Тихому океану по данным поверхностных волн (Балтийский шит) или годографам первых вступлений продольных волн от землетрясений. Скоростные разрезы мантии этих регионов характеризуют в значительной степени ее осредненное строение.

На Кавказе и юго-востоке Туранской плиты наблюдается рост сейсмических скоростей с глубиной в диапазоне глубин приблизительно от 350 (Средняя Азия)–380 км (Кавказ) и до 500–520 км, темп этого ускорения возрастает в 3–4 раза (до 0,10–0,11 сек<sup>-1</sup>). На больших глубинах скорости практически совпадают с разрезами, построенными по осредненным годографам Джеффриса–Буллена и Херрина.

Памиро–Гиндукушская зона изучена советскими исследователями и их индийскими коллегами (Бунэ и др., 1960; Лукк, Нерсесов, 1965, 1966; Матвеева, Алексеев, 1964; Дуре, 1969, 1970; Tandon, 1967; и др.). Наиболее детальные результаты (Лукк, Нерсесов, 1965) свидетельствуют о том, что до глубины 240 км изменение скоростей продольных и поперечных волн аналогично: на глубинах 85 и 200 км отмечены границы резкого (на 0,2–0,4 км/сек) увеличения скоростей. От 110 до 150 км отмечен слой понижения скоростей. Ниже 200 км продольные волны слабо возрастают, а для поперечных в диапазоне глубин 240–400 км отмечается второй волновод. Глубже 400 км скорости возрастают, особенно быстро между 400 и 450 км. В диапазоне глубин 700–780 км выделен высокоградиентный слой.

В самое последнее время выполнены интересные исследования мантии Памира и Гиндукуша, основанные на анализе времен пробега волн от землетрясений на эпицентральных расстояниях 30–40° (Винник, Лукк, 1974).

В результате установлено изменение скоростного строения верхней мантии в горизонтальном направлении при переходе на юг от Памира к Гиндукушу. Установлено, что в верхней 300-километровой толще мантии существует высокоскоростная зона. Ее границы приблизительно совпадают с границами тектонических структур, например северо-западная соответствует глубинному Дарвах–Каракульскому разлому.

Просвечивание Памиро–Гиндукушской фокальной зоны сейсмическими волнами от удаленных землетрясений из различных азимутальных зон показало, что в интервале глубин 50–380 км, где происходит ежегодно до 200 подземных толчков, поглощение сейсмических волн, особенно продольных, существенно выше, чем в окружающей среде (Лукк, 1970, 1971).

Интерпретация материалов, полученных на сейсмологическом профиле Памир–Байкал, свидетельствует о том, что строение мантии вдоль профиля меняется. Зона пониженных скоростей, выделяемая на Памире на глубинах 50–150 км ниже подошвы коры, при приближении к структурам Тянь–Шаня быстро уменьшается вплоть до полного выклинивания и Алтае–Саянской зоне. Аналогичная зона в том же диапазоне глубин появляется в районе Восточных Саян и Байкальского рифта. Сопоставление сейсмологических результатов с данными ГСЗ в области Байкальского рифта (Крылов, 1971) показывает, что зона пониженных скоростей под подошвой коры в области рифта и более глубокая астеносфера разделены слоем с относительно повышенными (8,0–8,1 км/сек) скоростями. Толща этого слоя составляет примерно 20–30 км.

Анализ сейсмологических данных профиля Памир–Байкал и площадной системы станций Забайкалья дает основания предположить, что глубинная зона пониженных скоростей под Байкальским рифтом генетически связана с еще более обширной областью пониженных скоростей, находящейся под районами Монголии, прыгающими с юга к Байкальской рифтовой зоне (Бугаевский, 1971; Бугаевский, Нерсесов, Рогожина, 1971; Рогожина, 1968).

Сопоставление скоростных разрезов мантии Памира и Туранской плиты свидетельствует о том, что на северо-восток и северо-запад от Памира зона пониженных скоростей выклинивается (Рябой, Старобинец, 1973).

Изучение динамических характеристик записей первых вступлений от удаленных землетрясений на Северном Тянь-Шане также подтверждает неоднородность верхней мантии (Седова, 1971). Изменение формы сейсмического сигнала, распределение амплитуд по площади и в зависимости от азимута на эпицентр показали, что в интервале глубин 80–100 км ниже границы Мохоравичича находятся довольно редкие, но четкие мелкомасштабные неоднородности. Причем горизонтальная неоднородность в районе щитов и, может быть, платформы развита слабее, чем в геосинклинальных областях (Нерсесов, Николаев, Седова, 1972). Глубже 200–300 км мантия становится "прозрачнее". Результаты сейсмологических исследований на профиле Памир-Байкал также показывают, что с этих глубин мантия становится однороднее и в отношении горизонтальных вариаций крупномасштабных скоростных неоднородностей.

Вдоль всего профиля Памир-Байкал на глубинах 200–300 км ниже подошвы коры выделен высокоградиентный слой, в котором скорость нарастает от кровли до подошвы с 8,2–8,3 до 8,8–8,9 км/сек.

Обработка записки афтершоков Китайского землетрясения 21 мая 1962 г. показала, что в мантии под Евразийским континентом на глубинах 350 и, вероятно, 680 км существуют резкие границы раздела, где скорость скачком возрастает до 9,5 и 11 км/сек (Голенецкий, Медведева, 1965).

Довольно подробно изучена зона перехода от Азиатского континента к Тихому океану.

Скоростные разрезы Камчатки и Северо-Курильских островов (Федотов и др., 1964; Федотов, 1966; Федотов, Славина, 1968 и др.), а также Южно-Курильских островов и Хоккайдо (Тараканов, 1963, 1965, 1969; Тараканов, Левый, 1965, 1967, 1969) содержат несколько слоев пониженных скоростей мощностью по 30–60 км. Самый верхний расположен в диапазоне глубин 65–95 км, нижний – на 370–430 км.

На основе совместной корреляции скоростей продольных и поперечных волн, производной эмпирического годографа, амплитудных кривых, продольных магнитуд землетрясений и некоторых других эмпирических данных Р.З. Тараканов и Н.В. Левый пришли к выводу о существовании в мантии слоев повышенной и пониженной прочности. Они показали, что для астеносфер характерна повышенная пластичность и усиленное поглощение сейсмических волн. С.А. Федотов (1963) также отмечает аномально высокое поглощение поперечных волн под Курильскими островами на глубинах 60–110 км с максимумом на 80–90 км; для Японии максимум поглощения отмечен на глубине около 100 км (Wadati, Hirono, 1956).

Поскольку температура под Курильскими островами на 100° выше, чем в других районах на этих же глубинах (Федотов, 1963), а кроме того, здесь же были обнаружены карманы жидкой магмы (Горшков, 1956, 1958), то С.А. Федотов предположил, что тут находятся области магмообразования с включениями жидкой составляющей до 20% (Федотов, Фарберов, 1966), а Р.З. Тараканов пришел к выводу, что такими областями являются зоны пересечения водноводов фокальной плоскостью (Тараканов, 1963, 1965 и др.).

На менее детальных разрезах, характеризующих строение Курило-Камчатской дуги и прилегающих районов Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (Матвеева, Алексеев, 1964; Матвеева, Славина, 1971; Азбель, Кондорская, 1974), слои с пониженными скоростями не выделяются. В целом эти районы характеризуются низкими скоростями (от подошвы до 120–150 км ниже нее они меняются от 7,5–7,8 до 8,1–8,2 км/сек). На глубинах 875–400 и 630–650 км ниже подошвы коры отмечены области быстрого увеличения скоростей.

Наиболее детальные исследования показывают наличие в области перехода от Азиатского материка к Тихому океану значительных горизонтальных неоднородностей (Кузин, 1972).

Четко различаются континентальный, океанический блоки и фокальная зона. Самые низкие скорости в мантии отмечаются в континентальном блоке (под Камчаткой), самые высокие — в фокальной зоне, промежуточные — в океаническом блоке. Эти различия отмечаются до глубин 100–120 км. Хотя от 60 до 120 км в фокальной зоне наблюдается инверсия скоростей и распределение их становится близким к волноводу Б. Гутенберга (Gutenberg, 1959) или первой астеносфере Р.З. Тараканова (Тараканов, Левый, 1967), но скорости здесь, как правило, систематически выше, чем в прилежащих блоках на 0,2–0,3 км/сек.

Кроме неоднородностей первого порядка (континентальный, океанический блоки и более твердая и жесткая фокальная зона), выявились неоднородности второго порядка, связанные с изменением свойств фокальной зоны по простиранию. Выяснилось, что распределение скоростей в фокальной зоне сложное: области повышенных скоростей, в которых скорости убывают с глубиной, перемежаются с областями пониженных скоростей, в пределах которых скорости с глубиной возрастают. Это мозаичное расположение областей повышенных и пониженных скоростей отмечается до глубины 100 км, на которой расположена граница между континентальным блоком и фокальной зоной.

Указанное соотношение скоростных характеристик мантии фокальной зоны, континентального и океанического блоков верно только в самом общем виде. Из-за сложного, мозаичного характера строения фокальной зоны оно весьма неодинаково в том или ином районе и меняется с глубиной. "При этом возможны крайние случаи, когда скорости в области фокальной зоны ниже или выше, чем в мантии континентального и океанического блоков, и вариант, когда скорости в фокальной зоне имеют промежуточное значение между скоростями в мантии упомянутых блоков" (Кузин, 1971, стр. 170).

Автор приходит к выводу, что сложность соотношений скоростных характеристик мантии, как в пределах отдельных участков фокальной зоны, так и между фокальной зоной и окружающей мантией для района Восточной Камчатки является, по-видимому, отражением сложных процессов, которые происходят в мантии островных дуг.

Чередование высоко- и низкоскоростных участков границы Мохоровичича на сравнительно небольшом пространстве привело еще в начале 60-х годов ряд советских исследователей (Вейцман, 1965; Косминская, 1966; Косминская, Шейнманн, 1965; Ризниченко, Косминская, 1963; "Строение земной коры в области перехода...", 1965; Тулина, 1965; Федотов, 1966) к заключению, что сейсмические данные, как и гравитационные, свидетельствуют о блоковом строении мантии. Впоследствии эти идеи получили развитие и за рубежом (например, Ритсема, 1972). Более поздние исследования области перехода от Азиатского континента к Тихому океану подтвердили эту мысль (Зверев, 1969; Зверев, Тулина, 1969; Космическая, Зверев, 1969; Федотов и др., 1964; Федотов, Славина, 1968; Кузин, 1972; и др.).

Ряд исследователей идею о блоковом строении мантии зон перехода от Азиатского материка к Тихому океану (континентальный, океанический блок и фокальная зона) распространили на строение мантии вообще. Они нашли, что между крупными блоками коры и верхов мантии устанавливаются определенные соответствия, так что для некоторых зон можно говорить о коре-мантийных блоках (Вейцман, 1965; Ризниченко, Косминская, 1963; "Строение земной коры в области перехода...", 1964).

Выделяемые блоки, по мнению ряда авторов, различаются по величине: относительно малые могут в отдельных случаях объединяться внутри слоев вместе с разделяющими их швами, создавая своего рода "мозаичность". Блоки значительных размеров нередко секутся сейсмическими границами. Например, П.С. Вейцман рассмотрела блоки, соответствующие материкам и океанам. Она построила разрез через Тихий океан, показывая, что океанический блок четко отделен на востоке и западе от континентальных блоков Азии и Южной Америки блоками концентрации очагов землетрясений, уходящими наклонно под континенты, и подчеркнула, что "зоны подвижек, разделяющие стабильные в

сейсмическом отношении блоки, наблюдаются в других масштабах и в более высоких этажах Земли" (Вейцман, 1965, стр. 26).

С.М. Зверев (1969) по изменению уровня амплитуд и градиентов скоростей сейсмических волн выделил блоки в пределах океанической мантии.

На платформах слоисто-блоковую структуру мантии отмечают: для Кольского полуострова и Карелии И.В. Литвиненко (1967), для Средней Азии И.С. Вольвовский и др. (1969), для Азово-Кубанской впадины И.В. Померанцева и др. (Померанцева, Мозженко и др., 1967 и др.), для Урала Н.И. Халевин и др. (1970). Причем последние показывают, что внутри коро-мантийных блоков происходит изостатическая компенсация, разные структурные элементы коры характеризуются различным состоянием подкорового субстрата — положительным из них (сводам, мегантиклиналям) соответствуют зоны уменьшения плотности, а отрицательным (впадинам) — зоны возрастания плотности подкоровых масс.

На основе статистической обработки результатов интерпретации материалов ГСЗ Н.А. Беляевский, И.С. Вольвовский и В.З. Рябой (1972) и И.С. Вольвовский (1973<sub>1</sub>) установили слоисто-блоковую структуру мантии под территорией СССР, хотя эти же авторы подчеркивают гетерогенность самых верхних частей мантии и увеличение ее гомогенности с глубиной.

Итак, результаты сейсмологических исследований верхней мантии под территорией СССР свидетельствуют о том, что скоростные параметры меняются в горизонтальном направлении в широких пределах, особенно до глубин 200–250 км ниже подошвы коры ( $v_p$  меняется от 7,4–7,6 до 8,8–9,0 км/сек). С глубиной неоднородность мантии уменьшается, что можно видеть, сопоставив разброс скоростей на разрезах, соответствующих различным регионам (Рябой, Старобинец, 1973).

Анализ изменения с глубиной градиентов скоростей сейсмических волн на основе данных ГСЗ по территории СССР также показал, что дисперсия скоростей (по вертикали) с глубиной становится меньше в поле как преобладающих, так и единичных значений скоростей, что указывает на возрастание сейсмической однородности, которая наиболее резко проявляется в верхней мантии (Беляевский, Вольвовский, Рябой, 1971, 1972; Вольвовский, 1973; Вольвовский, Вольвовский, в печати). Об этом же свидетельствует исследование изменения с глубиной мелких неоднородностей мантии (Николаев, 1973).

Однако, несмотря на эту тенденцию, при переходе от одного региона к другому меняется и величина сейсмических скоростей и характер их изменения с глубиной. Например, уже сейчас ясно, что глобального волновода мощностью 50–100 км не существует. В одних районах встречаются мощные слои пониженной скорости и даже, как в Курило-Камчатской зоне, их выделено до четырех, в других (Балтийский щит, Туранская плита) слои пониженной скорости не выделены. При переходе из одного района в другой параметры слоев с пониженными скоростями варьируют вплоть до полного их выклинивания, как это отмечено в Алтае-Саянской зоне, на Балтийском щите и в некоторых других районах.

В среднем более низкие значения сейсмических скоростей и более мощные слои пониженных скоростей отмечаются в складчатых областях, зоне перехода от Азиатского континента к Тихому океану и Байкальской рифтовой зоне, т.е. в тектонически активных районах. Платформы же и щиты характеризуются более высокими значениями мантийных скоростей и слабо развитыми волноводами. Нередко к этим же районам приурочено повышенное поглощение сейсмической энергии, например в Байкальской рифтовой зоне и в области перехода от Азиатского континента к Тихому океану (Винник, Годзиковская, 1972).

Опыт отечественных и зарубежных исследований показал, что в некоторых районах законы изменения с глубиной для скоростей продольных и поперечных волн различны. Например, на Памире и Северо-Американской платформе понижение скоростей распространения поперечных волн не сопровождается подобным понижением для продольных, в других случаях (Юго-Восточные Карпаты) различаются толщина и глубинное положение волноводов продольных и попе-

речных волн (Лукк, Нерсесов, 1965; Сагалова, 1973; Lewis, Meyer, 1968; и др.). Это свидетельствует о том, что поперечные волны – весьма существенный дополнительный источник информации.

Азия. Значения сейсмических скоростей  $v_p$  вдоль поверхности Мохоровичича для Японских островов и восточной части Японского моря меняются от 7,7 до 8,0 км/сек, увеличиваясь к Тихому океану (Rikitake, 1968). По данным переинтерпретации материалов ГСЗ для Японии, на 15–25 км глубже подошвы коры выделена граница, где скорость растет до 8,0 км/сек (Туезов, Жильцов, 1972).

Как мы уже писали, в 1926 г. при анализе амплитуд колебаний, возникших при землетрясении, происшедшем 1 сентября 1923 г. в Японии, Б. Гутенберг обнаружил зону тени и интерпретировал ее как результат существования слоя пониженных скоростей в диапазоне глубин 50–150 км (Гутенберг, 1963; Gutenberg, 1948, 1953). Позднее этот вывод подтвердили Весанен и его соавторы, также изучая времена пробега сейсмических волн от землетрясений Японии в 1927–1937 гг. при разных глубинах очагов (Vesanen et al., 1959). Они установили, что минимум скоростей лежит примерно на глубине 80 км. Позднейшие работы детализировали эти результаты; кроме того, анализ невязок экспериментальных и теоретических годографов показал наличие значительных горизонтальных неоднородностей мантии в районе Японских островов (Hisamoto, 1965; Husebye, 1965; Utsu, 1967; Ichikawa, 1969; Kanamori, 1968; Туезов, Жильцов, 1972). Основные результаты этих исследований групповых скоростей волн Релея и Лява (Kanamori, Abe, 1968), свидетельствуют о том, что верхняя мантия между материком и островной дугой по сравнению с океанской характеризуется более низкими значениями скоростей сейсмических волн и большим поглощением их энергии (Kaila et al., 1971; Kanamori, 1970; Mesco, 1971).

Ряд авторов выделяет аномально низкие скорости ( $v_p \sim 7,6$  км/сек) непосредственно под подошвой коры Японских островов (Kanamori, 1963; Kishimoto et al., 1964; Japanese National Report, 1967; Федотов, Матвеева, Тараканов, Яновская, 1964; Jeffreys, 1966; Туезов, Жильцов, 1972). Судя по сводке скоростей на границе Мохоровичича (Drake, Nafe, 1968), слой со скоростями продольных волн 7,2–7,7 км/сек под подошвой коры – типичная особенность областей активной тектоники.

Под океаном же, к востоку от Тихоокеанской фокальной зоны, скорости продольных волн в среднем составляют 8,1–8,2 км/сек (Федоров, 1969). Скоростные различия мантии под островами и океаном сохраняются до глубин не менее 400–500 км.

Две различающиеся мантийные зоны разграничены глубокой плоскостью, наклоненной в сторону материка. К ней в основном приурочены очаги землетрясений.

На глубинах от 60–70 до 180–200 км выделяется слой пониженных скоростей ( $v_p$  уменьшается от 7,9 до 7,6–7,7 км/сек, а на его подошве возрастает до 8,5 км/сек). К этим же глубинам приурочены области максимального поглощения энергии поперечных сейсмических волн (Wadati, Hirono, 1956). Резкое увеличение скорости продольных волн (до 9–9,2 км/сек) и максимум выделения сейсмической энергии отмечается на глубине 375–400 км; другая граница, где резко растет скорость (от 9 до 10,6–10,7 км/сек), расположена приблизительно на 630–660 км (Kanamori, 1967, 1968).

Северные районы весьма значительно отличаются по глубинному строению от южных (Carr et al., 1973; Mesco, 1971; Туезов, Жильцов, 1972), так как на севере кровля слоя низких скоростей поднимается непосредственно к подошве земной коры.

Полуостров Индостан характеризуется высокой сейсмической активностью, к его территории с севера и юга примыкают сейсмоактивные районы. Однако, хотя в Индии условия для сейсмологических наблюдений благоприятные, а, кроме того, для изучения глубинного строения здесь используются ядерные

взрывы, производимые вне ее территории (Warma, 1970; Kaila et al., 1970) и записываемые более чем 20 действующими станциями (Kaila et al., 1970), эти работы начаты сравнительно недавно. Поэтому данных для выяснения строения такой обширной территории недостаточно. Можно лишь сказать, что мощность коры здесь меняется от 35–40 км под субконтинентом до 20 км в районе Андамских островов, в этом же направлении уменьшаются скорости мантийных волн (Kaila et al., 1970; Aroga, 1971). В южной части полуострова выделены две резкие границы на глубинах от подошвы коры 350–370 и 700–720 км, где скорости сейсмических волн растут скачком. К северу глубины границы и перепад скоростей на них меняются вплоть до того, что на глубине примерно 400 км границы в северо-западном направлении исчезают совсем.

Наиболее подробно изучен район Гималаев (Kaila et al., 1971). На основании записей землетрясений 1966–1970 г. авторы определили мощность коры от 60 до 80 км и построили модель мантии без волновода. Однако они сами выражают сомнения по поводу однозначности своих выводов.

На основе анализа времен пробега от мелкофокусных землетрясений 1962–1966 г. построены скоростные модели для Гиндукуша (Dube, 1969, 1970; Tandon, 1967). Эти данные хорошо согласуются с полученными советскими геологами для Памира (Лукк и Нерсесов, 1965).

Австралия. В Австралии первые надежные сведения о глубине Мохо ( $\sim 35$ –40 км) получены в 1956 г. при регистрации ядерных взрывов (Рихтер, 1963). В результате исследований ядерных и химических взрывов, а также записей землетрясений здесь установлены две области, различные по строению коры и мантии – более “высокоскоростной” Австралийский щит ( $v_p = 8,1$ – $8,4$  км/сек) и примыкающие к нему с востока “низкоскоростные” районы ( $v_p = 7,7$ – $8,1$  км/сек) (Cleary, 1971; Underwood, 1969; и др.). Эти различия сохраняются в верхней мантии по крайней мере до глубин 200 км. Предполагается, что под щитом слой пониженных скоростей или отсутствует или развит очень слабо (Cleary et al., 1972).

Изучение более 300 землетрясений, происшедших в 1968–1969 гг. в Индонезии, Новой Гвинее и на Филиппинах и записанных с помощью большой сейсмологической группы, позволило построить скоростную модель для севера Австралии до глубин приблизительно 800 км (Simpson et al., 1971). Для нее характерны три границы на глубинах от подошвы коры 250, 400 и 600 км, на которых скорость растет скачком.

Африка. В Африке, как и на других континентах, обнаружены неоднородности в строении мантии. Наиболее высокие значения скоростей продольных и поперечных волн, аналогичные полученным на Канадском и Балтийском щитах, характерны для юго-восточных районов Африки. В рифтовой зоне Восточной Африки скорости сейсмических волн относительно низки: 7,7–7,8 км/сек (Markis et al., 1970); это характерно и для Красного моря и Аденского залива, причем понижение скорости волн прослеживается в мантии до глубины не менее 150 км (Fairheadler, 1971). В Юго-Западной Африке скорости мантийных волн выше: 3,05 в Либерии (Dorel, 1968) и 8,08–8,17 км/сек в Сьерра-Леоне (Sheridan et al., 1969). В Южной Африке еще выше: в Трансваале – 8,27 км/сек (Gane et al., 1956); в прибрежных районах западной Африки преобладают значения 8,15–8,25 (Ludwig et al., 1968). Среднее значение равно 8,06 км/сек (Gumper, Romerou, 1970).

Скоростные модели для отдельных районов, построенные по дисперсионным кривым поверхностных волн, прошедших под континентом, свидетельствуют о существовании волновода (Рябой, Старобинец, 1974). По одним данным (Gumper, Romerou, 1970), слой пониженных скоростей расположен на глубинах 180–280 км ниже подошвы коры. По другим данным, выделены два волновода на глубинах 60 и 150 км мощностью соответственно 2 и 5 км (Bloch, 1969).

В Антарктиде исследования начаты недавно. В 1969 г. советские геофизики впервые определили здесь скорости мантийных волн (8,0 км/сек) в результате проведения ГСЗ в районе Новолазаревской.

Океаны. Строение мантии под океанами изучено слабее, чем под континентами.

Активное исследование коры и мантии Атлантического океана началось после второй мировой войны. Большая часть результатов опубликована в сводках (Hill, 1957; Lee et al., 1966; McConnel et al., 1966).

На основе анализа данных о преломленных волнах Дж. Юинг построил сводный разрез коры и мантии Атлантического океана (Юинг, 1972). Он же опубликовал (Ewing, 1963) обзорную работу о строении мантии под океанами по данным преломленных волн. За следующие 5–7 лет было получено много новых данных по Тихому океану (особенно с помощью ГСЗ). В несколько раз возрос объем сведений по Индийскому океану (Francis, Raitt, 1967; и др.). Этот материал обобщили Дж.Г.Шор и Р.У.Райтт (1972). Данные для океанов различны: "мантийные скорости продольных волн в Тихом океане несколько выше, чем в Индийском и Атлантическом (Francis, Raitt, 1967; Keen, Tramontini, 1970). То же относится и к поперечным волнам (Kovach, Press, 1961; Аки, Пресс, 1964). Однако не исключено, что эти различия объясняются неодинаковым объемом работ в пределах разных структурных элементов (равнины, рифты, желоба) (Шор, Райтт, 1972).

Наиболее низкие скорости в мантии обнаружены в районах срединно-океанических хребтов и островных дуг (Непрочнов, 1970; Шор, Райтт, 1973; Demenitskaya et al., 1968; Francis, 1969; Hill, 1969; Keen, Tramontini, 1970; Kovach, Press, 1961; Le Pichon et al., 1965; и др.).

Скорости сейсмических волн под срединными хребтами меняются довольно сильно, иногда они аномально низкие лишь в осевой части хребта (Keen, Tramontini, 1970). Это объясняется результатами совместной интерпретации сейсмических и гравиметрических данных, которые свидетельствуют о том, что под срединными хребтами залегают линзы низкоскоростных пород (Атлантический и Срединно-Тихоокеанический рифты). Например, под Срединно-Атлантическим хребтом низкоскоростная линзовидная зона толщиной 30–40 км и шириной до 1000 км и более (со скоростью  $v_p = 7,3$  км/сек) заключена в "нормальную" мантию ( $v_p = 8,1–8,2$  км/сек) (Triggvason, 1961, 1962; 1963; Ewing, 1963; Talvani, 1965 и др.).

Вместе с тем Ю.П. Непрочнов и Л.Н. Рыкунов (1970) при анализе некоторых профилей ГСЗ обнаружили под дном рифтовой долины Аравийско-Индийского хребта на глубине около 15 км слой повышенной скорости (Непрочнов и др., 1969, 1970, 1971). Отметим, что подобные слои (с  $v_p = 8,4–9,0$  км/сек) на сравнительно небольших глубинах под подошвой коры обнаружены в западной части Тихого океана (Косминская, Зверев, 1969), а также на материке (Косминская, 1968; Непрочнов, Рыкунов, 1970). Это не только подтверждает неоднородность верхов мантии, но и свидетельствует об ее уплотнении в ряде районов.

Скоростные модели верхней мантии океанов, которые строятся в основном на данных поверхностных волн, подтверждают, что есть слой пониженных скоростей, глубина, мощность и параметры которого весьма изменчивы (Аки, Press, 1961; Sykes et al., 1962; Брюн, 1972; Дорман, 1972). Так, в Тихом океане (Knoroff et al., 1970) глубина его кровли мигрирует от 50 до 100 км, мощность варьирует от 50 до 150 км, скорость поперечных волн меняется от 4,4–4,8 до 3,5–4,1 км/сек.

В районе срединных хребтов и островных дуг, как показали исследования объемных волн, например для Исландии (Francis, 1969), зона пониженных скоростей располагается прямо под поверхностью Мохо, простираясь до глубин не менее 100–200 км.

Аналогичные результаты были получены и для Меланезии (Jacques, 1971).

В пределах Тонга-Кермадекской дуги получена сложная горизонтально неоднородная модель верхней мантии (Barazangi, 1971).

Анизотропия. Исследования в океанах привели к одному из важнейших открытий в области изучения строения мантии. Установление неоднородностей

ее строения, особенно на основе данных по поверхностным волнам, привело к мысли о возможной анизотропии свойств мантийного вещества.

Теоретическое исследование на эту тему принадлежит Д.Л. Андерсону (Anderson, 1961). Он показал, что значительная анизотропия может существовать в слоях пониженной скорости (Anderson, Harkrider, 1962). Мысли о возможной анизотропии некоторых слоев мантии высказывали Л.М. Балакина и А.В. Введенская (1957, 1959), исходя из особенностей полей смещений продольных и поперечных волн.

В 1964 г. Х. Хесс (Hess, 1964), анализируя работы Р.У. Райтта и Дж.Г. Шора, обнаружил, что величина скорости в мантии зависит от направления распространения волн (с максимумом — 8,6 км/сек — при направлении на восток и с минимумом — 8,0 км/сек — на север). Но так как эти исследования проводились на участках, разбросанных от берегов Калифорнии до Гавайских островов, то можно было предполагать, что различия в скоростях обусловлены горизонтальными неоднородностями мантии.

Поэтому Океанографический институт Скриппса предпринял в 1966 г. специальные исследования у берегов Калифорнии для выявления анизотропии — программы "Квартет" и "Флора" (Raitt et al., 1967). Были организованы также экспедиции SHOW и HILO в районе Гавайской дуги. Результаты этих работ подтвердили идею Хесса об анизотропии (до 2–8%) скоростей в некоторых районах Тихого (Raitt et al., 1971; Keen, Barrett, 1971, Моррис, 1969) и Атлантического (Keen, Tramontini, 1970) океанов. В Тихом океане сейсмические волны распространяются быстрее всего перпендикулярно оси Восточно-Тихоокеанского поднятия в его экваториальной части.

В дальнейшем было показано, что анизотропия возможна не только в мантии океана. Так, И.А. Резанов и Н.Е. Галдин (1967) обнаружили, что скорость сейсмических волн вообще зависит от направления их распространения. В одном и том же слое вдоль глубинной структуры луч распространяется быстрее, чем поперек нее. Лабораторные испытания при всесторонних высоких давлениях также показали анизотропию (на 5–20%) упругих свойств метаморфических горных пород. Авторы делают вывод, что анизотропия сейсмических скоростей объясняется анизотропией физических свойств метаморфических пород, слагающих кору, а возможно, — и верхи мантии.

И все-таки современные данные не позволяют утверждать, что анизотропия скоростей в мантии — явление повсеместное (Рябой, Старобинец, 1974).

#### Общие закономерности строения мантии.

1. Как видно из рассмотрения особенностей глубинного строения различных регионов, один из основных выводов о строении верхней мантии заключается в том, что она весьма неоднородна по своим скоростным параметрам.

Наиболее высокие сейсмические скорости соответствуют стабильным частям континентов, более низкие — тектонически активным регионам.

Океаны отличаются более высокими скоростями "мантийных" волн, чем континенты и большей дифференцированностью, хотя и не такой большой, как считали ранее (например, Гурарий, Соловьева, 1963). Самые низкие скорости сейсмических волн характерны также для наиболее тектонически активных районов — островные дуги и рифтовые зоны.

Однако эти закономерности носят лишь самый общий характер. Так, в некоторых тектонически активных районах континентов на глубинах 200–380 км скорость поперечных волн на 4–5% больше, чем на океанах (Рябой, Старобинец, 1974).

Разные регионы отличаются не только значениями скоростей сейсмических волн, но и характером изменения их с глубиной, что свидетельствует о различии типов и направленности тектонических процессов.

2. Уменьшаясь с глубиной, отмеченные закономерности сохраняются тем не менее на сотни километров в глубь Земли (Вольвовский, 1973; Кузин, 1971; Рябой, Старобинец, 1973, 1974, Славина, 1970 и др.). Так, Кузин отмечает их до глубины примерно 400 км. Ниже мантия однороднее, и для эпицентральных расстояний, превышающих  $20^{\circ}$ , времена пробега довольно хо-

рошо согласуются с годографом Джеффриса-Буллена, однако в некоторых районах скоростной разрез отличается от стандартного до глубин 1000 км (Славина, 1970). Высказываются даже мнения о существовании горизонтальных неоднородностей в низах мантии (Chinnery, 1966), о возникновении их на границе ядро - мантия (Alexander, Phinney, 1966).

3. Третий весьма существенный вывод заключается в установлении слоистости границы Мохо и верхов мантии, причем бóльшая дифференцированность свойственна тектонически более активным районам. Однако это лишь самая общая тенденция. Анализ дисперсионных кривых для различных путей поверхностных волн через Альпийский пояс и районы с более стабильной континентальной корой показал, что эти кривые пересекаются. Аналогичное явление отмечается в Японии. Аки сделал на этом основании вывод, что невозможно построить единую для всей Земли модель верхней мантии, которая подходила бы для всех континентальных областей и предусматривала лишь вариации в расположении глубинных границ. Не параллельны и дисперсионные кривые для различных стабильных областей. Разность между фазовыми скоростями волн Релея и Лява во внутренних центральных районах США почти вдвое выше, чем в Финляндии. Данные по Канадскому щиту занимают промежуточное положение. Эти особенности распространения поверхностных волн могут объясняться региональными изменениями слоистости мантии, но могут оказаться связанными и с ее анизотропией.

4. Выявление анизотропии некоторых слоев верхней мантии - одно из важнейших открытий последних лет.

5. Характерная черта строения мантии - наличие слоев пониженной скорости, хотя они встречаются не повсеместно. В пределах щитов они, вероятно, отсутствуют или выражены слабо, а в некоторых тектонически активных зонах выделено несколько астеносфер. Не исключено, что в пределах срединно-океанских хребтов и рифтовых зон астеносфера поднимается к подошве коры.

6. Ниже астеносферы часто отмечаются границы или области резкого увеличения скоростей, расположенные в диапазонах глубин между 350-400 и 600-700 км. Глубина их залегания и перепад скоростей на них сильно варьируют.

7. Ниже астеносферы или между астеносферами ряд авторов отмечает наличие высокоскоростных или высокоградиентных слоев.

Проведя сопоставление изменения с глубиной упругих констант и скоростей, Н.Е. Мартынов (1957) пришел к заключению, что оболочка Земли представляет собой твердое сжатое тело, внутри которого на фоне общего сжатия имеются области относительного растяжения. Верхняя находится сразу под корой до глубины 80-96 км. Она характеризуется наличием очагов вулканизма и высокой частотой землетрясений. Вторая область растяжения - 450-900 км - совпадает со слоем резкого возрастания сейсмических скоростей и областью расположения очагов глубокофокусных землетрясений, а третья должна располагаться на глубинах 2700-2900 км. При этом степень растяжения в каждой области тем больше, чем больше сжатие в соседней.

Периодичность изменения свойств вещества мантии отметил также Г.Н. Бугаевский (1971).

Особое внимание исследователи уделяют так называемому слою С. Кровля его совпадает с обнаруженной Е.Б. Голицыным (1915) и П. Байерли (Byerly, 1926) 20<sup>0</sup>-й границей раздела, которую впоследствии Г. Джеффрис трактовал (Jeffreys, 1939) как кровлю слоя с резким увеличением градиента скорости. В области кровли слоя С (400-450 км) модуль сдвига лишь немногим больше, чем у лучших сортов стали, а на глубине 900 км - вдвое больше (Саваренский, 1966). Основание этого слоя относят к границе Репетти (Repetti, 1930), наличие которой подтвердил Е.Ф. Саваренский, получив отражение от этой границы (Саваренский, 1941). Таким образом, этот слой совпадает со второй зоной растяжения Мартынова.

Не останавливаясь на работах, посвященных выяснению природы этого слоя, отметим лишь, что японский исследователь Г. Мики, используя уравнения хи-

мической физики, предложил метод расчета плотности и сейсмических скоростей в слое *C*. Расчеты показали, что оболочка однородна, но слой *C* не находится в состоянии гидростатического равновесия. Это объясняет аномальное поведение в нем сейсмических волн, которое ранее относили за счет неоднородности слоя *C*. Мики считает, что внутренняя сила, дополнительная к градиенту давления, вдвое превышает величину силы тяжести и действует тоже к центру Земли (Miki, 1956). Л.М. Балакина и А.В. Введенская (1959) не исключают, что такова же природа анизотропии в открытых ими слоях с двойным лучепреломлением.

## ВЫВОДЫ

Переломным в сейсмических исследованиях мантии можно считать 1957 г. — год начала работ по международным проектам. После МГГ, а особенно во время работ по Проекту "Верхняя мантия", за счет ряда проанализированных в гл. III факторов резко увеличивается объем и качество информации о мантии. Это привело к разрешению проблемы волновода, к установлению горизонтальных неоднородностей мантии и в результате к пониманию того, что стандартный годограф недостаточен для выяснения ее строения на современном уровне знаний.

Переработать накопившуюся информацию стало возможным лишь с помощью ЭВМ. Внедрение ЭВМ повлекло за собой качественный скачок в развитии научного подхода к изучению мантии. Возник принципиально новый (вероятностно-статистический) подход к интерпретации сейсмического материала. Если к концу 60-х годов в литературе обсуждалось несколько вариантов строения мантии, причем каждый автор полагал свой разрез наиболее полным приближением к истине, в одном только случае равноценными считались два варианта (Буллен), то теперь на смену однозначной трактовке стандартного годографа пришла ясное представление о том, что одному и тому же экспериментальному материалу с равной степенью вероятности соответствует множество скоростных разрезов (Ф.Пресс, например, рассматривает несколько миллионов вариантов). Перед сейсмологами встала задача как можно полнее описать область всех возможных скоростных разрезов мантии, а затем уже минимизировать ее в поисках наиболее вероятных решений.

Если при сборе материала большая точность и достоверность представлений о строении мантии достигаются тем, что разворачиваются детальные сейсмические исследования в различных регионах, то в области интерпретации попытки минимизировать полосу скоростных разрезов осуществляется посредством разработки количественных методов совместной интерпретации совокупности всех сейсмических, а затем и геофизических данных о мантии.

Наряду с развитием комплексного подхода, ведется работа по улучшению методов интерполяции годографа: обобщается, а затем уже становятся более строгими методы его "обращения", что связано с детальной статистической оценкой результатов: с точностью обработки задачи, вопросами единственности и устойчивости решения, доверительными интервалами результатов и т.д.

Из изложенного в главе материала видно, что реализация новых подходов вызывает качественное изменение в представлениях о мантии — иллюзорную точность средних цифр сменяет конкретное знание строения мантии в тектонически различных регионах; вместе с тем уточняются и общие закономерности ее строения.

Кроме того, вероятностно-статистический подход к интерпретации сейсмических данных приводит к тому, что, помимо детерминированных, создаются также стохастические модели реальных сред, позволяющие подметить относительно мелкие неоднородности в строении мантии.

## ГЛАВА IV

# ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ

### 1. РАЗВЕРТЫВАНИЕ ДЕТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В РЯДЕ РАЙОНОВ И РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ

Поскольку детальные сейсмические исследования строения мантии дали хорошие результаты, то естественно, что будет происходить их дальнейшее расширение. Причем особое внимание будет обращать на менее изученные структуры, в первую очередь океаны. В частности, прогнозируя тенденции дальнейшего развития сейсмологии взрывов, И.П. Косминская, Н.Н. Пузырев и А.С. Алексеев отмечают, что параллельно с проведением работ в рифтовых зонах континентов и зонах перехода от континента к океану особое место займут, видимо, океанские исследования. Регистрация землетрясений и взрывов будет проводиться с помощью универсальных донных и плавающих автономных приборов, расположенных по площади и на опорных профилях ГСЗ (Косминская, Пузырев, Алексеев, 1972).

Что касается интерпретации получаемых данных, то можно предположить дальнейшие усилия преодолеть неопределенность получаемых результатов. Осознание того, что "различие между детерминированным и вероятностным является резким, что вероятность стремится к определенности по мере того, как значение вероятности одного из возможных событий приближается к единице<sup>1</sup>, в сейсмологии преломляется в попытках отказа от стохастических моделей. Хотя они сыграли свою роль в определении неоднородностей мантии, но все-таки основная тенденция в интерпретации сейсмических данных состоит в попытке создать детерминированную модель мантии, учитывающую ее неоднородности.

В результате детального анализа кинематических и динамических характеристик сейсмических волн могут быть выделены более или менее однородные блоки коры и верхней мантии, в пределах которых изменением параметров в горизонтальном направлении можно пренебречь. При определении их скоростных разрезов используются методы, разработанные для горизонтально однородных сред. Сопоставление разрезов, полученных для разных блоков, позволяет судить о горизонтальных неоднородностях мантии. Наибольшие трудности возникают при изучении зон сочленения блоков (глубинных разломов), качественно выделяемых по аномальным изменениям волнового поля, разрыву корреляции основных волн, аномальному возрастанию или затуханию амплитуд и т.п. Количественная интерпретация этих зон весьма сложна.

При больших удалениях от пункта взрыва или эпицентра землетрясения сейсмические волны пересекают области, существенно различающиеся по своему строению. Интерпретация в рамках горизонтально однородных моделей в этом случае приводит к значительному усреднению результатов и снижению точности определения скоростей сейсмических волн.

<sup>1</sup> А. Рапопорт. Математические аспекты абстрактного анализа систем. — В сб. "Исследования по общей теории систем". М., "Прогресс", 1969, стр. 103.

Поэтому дальнейшее создание точных методов исследования горизонтальных неоднородностей среды происходит в направлении развития теории распространения сейсмических волн в сложных горизонтально неоднородных, блоковых моделях среды (Алексеев и др., 1970, 1971; Бурмаков, Облогина, 1971; Пилипенко, 1973; Jacoub, Scott, McKown, 1970; Wesson, 1971; и др.).

Для таких сред разработаны алгоритмы и составлены вычислительные программы расчета на ЭВМ теоретических годографов и амплитудных кривых различных типов волн. На базе этих программ и алгоритмов создаются методы интерпретации, основанные на переборе решений прямых задач для горизонтально неоднородных сред. Кроме того, разработаны новые методы интерпретации системы годографов рефрагированных волн для двумерных и трехмерных сред: метод нелинейного уравнения (Белоносова, Алексеев, 1970) и метод возмущений (Алексеев и др., 1969). Уже накоплен некоторый опыт интерпретации материалов ГСЗ в рамках горизонтально неоднородных моделей (Алексеев и др., 1971; Облогина и др., 1969; Павленкова и др., 1972; Бурмаков, Рябой, 1973; и др.).

Дальнейшее развитие методов интерпретации экспериментальных сейсмических материалов с учетом влияния горизонтальных неоднородностей — чрезвычайно важная и актуальная задача, успешное решение которой позволит повысить точность и детальность результатов глубинных исследований (Рябой, Старобинец, 1973).

## 2. КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ИЗУЧЕНИЮ МАНТИИ ЗЕМЛИ КАК ЧАСТЬ ГЕОНОМИЧЕСКОГО ПОДХОДА, ПРЕДЛОЖЕННОГО В. В. БЕЛОУСОВЫМ

Решение частных методических задач (в технике эксперимента — это освоение цифровой записи и расширение возможностей донных наблюдений и корреляционных систем на море; в методике — развитие площадных систем наблюдений: в интерпретации — более широкое использование синтетических сейсмических полей для разных видов моделей сред), направлено к единой цели, которую И.П. Косминская и Н.Н. Пузырев (1973) сформулировали как переход от констатации связей глубинных структур с поверхностными к созданию рабочих гипотез о характере этих связей и о процессах образования земных оболочек.

На сегодняшнем этапе сейсмических исследований ученые пытаются постигнуть взаимовлияния коры и мантии. С одной стороны, при рассмотрении строения мантии нужно снять эффект, оказываемый корой на прохождение сейсмических волн. Не имея достаточной информации о строении коры и точных координат землетрясений, исследователи при пересчете допускают значительные ошибки, что неизбежно приводит к ошибкам в определении скоростного строения мантии. Несомненно, что более детальное изучение земной коры существенно продвинет изучение мантии Земли (Алексеев и др., 1970).

С другой стороны, ясно, что установление основных особенностей строения мантии (значительные горизонтальные неоднородности до глубин 250–300 км; зона пониженных скоростей, параметры которой очень сильно меняются в горизонтальном направлении — от полного отсутствия этой зоны в некоторых районах, до ее расслоения на два–три слоя в других; резкое увеличение скоростей в диапазонах глубин 350–400 и 600–700 км), их сопоставление с геофизическими полями (гравитационным, геотермическим и др.) и особенности строения крупных геологических структур (платформы, щиты, тектонические активные регионы) позволяют сделать не только ряд важных выводов о вещественном составе мантии и о происходящих в ней процессах, но и об их влиянии на земную кору, о связи эволюции коры с процессами мантии, происходящими в течение геологического времени. По современным представлениям, латеральные неоднородности мантии приводят в действие механизм колебаний, которые, в свою очередь, вызывают изменения ее физических свойств

в горизонтальном и вертикальном направлениях и оказывают непосредственное влияние на строение, движение и развитие коры.

Указанный переход от констатации связей глубинных структур с поверхностными к созданию рабочих гипотез о характере этих связей и о процессах образования земных оболочек возможен лишь при оценке всего комплекса данных с учетом целостности коры и мантии, при рассмотрении их как единой системы, при выяснении соотношения элементов этой системы, характера их взаимодействий, а также направления ее развития.

Комплексный, системный подход пришел в сейсмологию из геотектоники. Он был намечен В.В. Белоусовым для познания строения недр и тех процессов, которые там происходят. Считая такой подход определяющим в развитии наук о Земле, но не имея возможности в рамках данной работы проиллюстрировать это, привлекая результаты комплексирования данных о мантии, мы позволим себе процитировать Белоусова, чтобы яснее изложить его мысль. "... Наиболее полноценные результаты могут быть получены только в том случае, если геологические, геофизические и геохимические методы будут использованы не просто параллельно, а совместно, в полном органическом согласии между собой...". Несомненно, существует много форм взаимоотношения между мантией и корой. Взаимоотношение может быть механическим ("импульсным"), когда движения в мантии вызывают соответствующие движения в коре. Оно может быть материальным ("пенетративным"), когда материал из мантии проникает в земную кору и влияет на ее состав и свойства. Оно может быть термическим, когда нагретый материал, проникая из мантии в кору, прогревает последнюю, вызывая в ней местное плавление и метаморфические процессы. Могут быть и другие виды взаимоотношения.

Подлежащие изучению процессы в коре либо прямо вызваны воздействием со стороны мантии, либо косвенно и отдаленно связаны с ее влиянием, и нельзя достоверно судить о глубинных процессах, не изучая строения коры и закономерностей тектонических, магматических и метаморфических процессов в ней.

Какая общая цель ставится перед геонаучными исследованиями? В геотектонической области цель состоит в разработке теории эндогенных геологических процессов, в выяснении причин и механизма развития: в практическом смысле — в разработке основ прогноза распространения на глубину эндогенных полезных ископаемых. Такие разработки становятся особенно настоятельными сейчас, когда поиски и добыча полезных ископаемых опускаются на все более глубокие уровни геологического разреза" (Белоусов, 1972, стр. 4 и 5).

Геонаучный подход получил признание в СССР, когда в народнохозяйственный план Советского Союза на 1971–1975 гг. в качестве государственной важной была включена задача "изучить геологическими, геофизическими и геохимическими методами строение и развитие земной коры и верхней мантии в их взаимосвязи с целью выяснения условий формирования полезных ископаемых".

Он получил признание и во всем мире, что выразилось в поддержке предложенного В.В. Белоусовым "Геодинамического проекта", в рамках которого в настоящее время ведутся экспериментальные исследования мантии и разрабатываются методы количественной интерпретации совокупности всех релевантных данных о ней.

### 3. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К СЕЙСМОЛОГИИ МАНТИИ В ЦЕЛЯХ ОПТИМИЗАЦИИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Научно-техническая революция коснулась и геофизики. В планетарной геофизике в XX в., особенно после второй мировой войны, происходят существенные изменения, обусловленные воздействием производства на науку. В сейсмологии, в частности, это диктуется, например, нуждами строительства — для создания городов и крупных долговременных сооружений необходимо более

точное знание о движениях коры; необходимость распознавания ядерных взрывов приводит к потребности уточнить глубины залегания волновода в мантии и к разработке точных методов интерпретации волнового поля.

Сейсмологии стали свойственны общие современные тенденции наук: глобальный характер исследований, работа больших коллективов, организация специальных дорогостоящих экспедиций и экспериментов, растущие темпы развития экспериментальной базы, ее технического оснащения. Например, для выполнения программы МГГ была создана международная система обмена информацией и координации, которая охватывала сотни, а по некоторым видам исследований и тысячи участников и огромное число согласованных операций (Повзнер, 1966, стр. 10). Это привело к осознанию того, что в бурном развитии геофизики уже важны не только творческие способности отдельных ученых. Произошло то, что характерно сегодня для различных областей знаний. Для иллюстрации сошлемся на высказывание двух крупнейших ученых современности. Н. Винер пишет: "Изобретения и открытия в старом смысле были вытеснены разумным использованием законов природы. Расстояние от законов природы до их использования было сокращено в сотни раз"<sup>1</sup>. Э. Тейлор отмечает другую особенность этого процесса: "Наука теперь движется широким фронтом малых открытий". Осмысление подобных явлений привело к рассмотрению самой науки как развивающейся системы, к попытке оптимизировать управление ею на основе такого подхода. В геофизике это проявилось в попытках оптимизировать организацию исследований (создание международных проектов, выбор наиболее существенных задач при их реализации, определение степени координации работ и т.д.).

В частности, проведение сейсмических исследований мантии мыслится только на основе планирования, при сочетании различных методов исследований и систем наблюдений различной детальности. Это мнение общепринято в среде советских сейсмологов. Например, В.З. Рябой и Л.Н. Старобинец показывают, что за последние 10-15 лет в практику геофизических исследований внедрены различные методы изучения скоростного строения мантии по записям объемных и поверхностных волн, порожденных землетрясениями и взрывами. Объемные волны дают более детальные результаты. Поверхностные волны проще регистрировать, с их помощью можно изучить более труднодоступные районы (моря, океаны, горы) и на больших пространствах. Но так как на пути их следования встречаются разные структуры, то они дают более "осредненную" картину. Поэтому рационально совместно использовать и объемные, и поверхностные волны (Рябой, Старобинец, 1974).

Эти же авторы отмечают, что наиболее детальные методы ГСЗ, однако глубинность их ограничена 100 км. При исследовании записей больших промышленных взрывов и землетрясений точность и детальность результатов значительно меньше, но глубинность достигает 500-700 км и более. Оптимальное сочетание различных методов сейсмических исследований верхней мантии позволяет получить с наименьшими затратами в достаточной степени точные и детальные результаты (Рябой, Старобинец, 1973).

Главный недостаток современных работ ГСЗ, по мнению И.П. Косминской и Н.Н. Пузырева, - слабая маневренность системами наблюдений разной детальности. Маневренность заключается в предусмотрении такого сочетания линейных и пространственных схем, которые дали бы максимальную информацию. При планировании нужно придерживаться строгой этапности с переходом от менее детальных к более детальным системам, причем последние следует планировать на основе первых только на отдельных, интересных в определенном отношении участках (Косминская, Пузырев, 1973).

Н.А. Беляевский и И.С. Вольвовский также находят, что согласование различных данных уже невозможно без постановки специальных теоретических и экспериментальных исследований, и прежде всего без разработки методики

<sup>1</sup> Н. Винер. Кибернетика и общество. М., ИЛ, 1958, стр. 152.

совместной регистрации взрывов и землетрясений (Беляевский, Вольвовский, 1969).

Мнение о необходимости планировать исследования разделяют не только советские ученые. Например, американские исследователи считают, что будущий прогресс в области взрывной сейсмологии зависит от более четкого планирования экспериментов и методов интерпретации и что важное значение имеет степень взаимного обмена информацией, особенно о неудачных экспериментах, о которых нет сведений в литературе (Хили, 1969).

От отдельных выводов о планировании эксперимента, оптимизации систем наблюдения и комплексирования методов некоторые сейсмологи пришли к убеждению о необходимости перестройки всей структуры сейсмологии. Приоритет в этой области принадлежит В.И. Кейлису-Бороку (1968), показавшему, что без логической перестройки сейсмологического анализа перевод сейсмологии даже на самые современные машины будет вряд ли возможен. Без этого использование машин вообще нецелесообразно, так как оно привело бы к массовому производству громоздких и трудно сопоставимых частных результатов и внесло бы только хаос в анализ в целом. В сейсмологии возникла бы ситуация, с которой уже столкнулись другие специалисты, использующие ЭВМ, и которая получила остроумное название "формализация беспорядка".

В идее логической перестройки процесса анализа сейсмических данных ясно виден подход к сейсмологии, как к системе, и понимание того, что введение в нее нового элемента — вычислительных машин — не просто добавляет новые связи этого элемента с другими, но меняет всю структуру взаимоотношений.

В сейсмологии происходит процесс, подобный описанному пионерами создания общей теории систем, и в частности Л.Берталанфи<sup>1</sup>. Они отмечали, что причиной возникновения этой теории явилась осознанная необходимость противодействовать чрезмерной специализации в науке, которая из-за отсутствия общего технического языка грозит уничтожить все связи между учеными в различных областях или даже в различных разделах одной и той же науки (точка зрения, убедительно показанная Н.Винером в книге "Кибернетика"<sup>2</sup>). Дифференциация сейсмологии привела к разграничению по объектам исследования: коре, мантии, ядру, географии землетрясений и т.п. По мере развития в каждой области исследований вырабатывался свой аппарат, и, главное, свои упрощенные представления о соседних областях. Возникла разобщенность, грозящая превратить сейсмологию в описательную науку.

Практический выход из этой ситуации стал возможен благодаря анализу структуры сейсмологии, выяснению соотношений ее элементов и попытке на них воздействовать. В.И. Кейлис-Борок осуществил этот подход в статье "Сейсмология и логика" (1968). Он предложил ввести структуру исследований, соответствующую не объектам, а естественной последовательности анализа сейсмических наблюдений.

Описывая детальнейшим образом этот процесс и рассматривая возможности формализовать и автоматизировать его отдельные этапы, автор намечает конкретное направление работы по реализации такой перестройки. Он показывает, что для формализации большей части операций, включая те, которые выполнялись интуитивно и даже служили предметом научного исследования, и для перевода их на язык машины требуется комплекс довольно сложных программ, часть которых уже разработана группой советских математиков и сейсмологов-теоретиков: сотрудников ИФЗ, Ленинградского отделения Математического института, Института химической физики, Института прикладной математики и Вычислительного центра АН СССР, и дает библиографию этих работ.

<sup>1</sup>Л. Берталанфи. Общая теория систем. — В сб. "Исследования по общей теории систем". М., "Прогресс", 1969.

<sup>2</sup>Н.Винер. Кибернетика. М., "Сов. радио", 1958.

Дальнейшая их публикация осуществляется в начавшейся в 1972 г. серии сборников "Программы для интерпретации сейсмических наблюдений" ("Программы ...", 1972).

Осуществление этих работ подтверждает идею Кейлиса-Борока о том, что вполне реально создать общую для всех разделов сейсмологии систему стандартной рутинной обработки наблюдений по единой схеме. Тогда центр тяжести исследовательской работы переместится на непосредственную разработку основных проблем. Первые шаги в этом направлении уже делаются "Программы..." (1972).

Важность применения системного подхода к развитию сейсмологии трудно переоценить, так как благодаря ему неизмеримо возрастают возможности влиять на действительность, в том числе и на судьбу науки. Вскрывая катастрофически отстающее развитие обратных связей, грозящее тем, что развитие самого процесса станет неконтролируемым, этот подход подсказывает выход из положения — стандартизацию и формализацию все большего числа элементов деятельности и вторжение вероятностных связей во все более обширные области. Осознание того обстоятельства, что будущее каждой науки зависит в значительной степени от того, насколько она способна ответить на этот вызов времени (Кейлис-Борок, 1968), дает все основания считать, что сейсмологи сумеют достойно ответить на этот вызов.

### ВЫВОДЫ

Анализ истории развития научных подходов при изучении верхней мантии сейсмическими методами дает возможность понять логику их изменения и наметить основные пути дальнейшего развития.

Естественно предположить дальнейшее развитие тех тенденций, которые намечаются на современном этапе сейсмических исследований мантии, а именно: дальнейшее преодоление неопределенности в представлении о строении мантии путем развития детальных сейсмических исследований в пределах тектонически различных структур, особенно в океанах, и разработки детерминированных горизонтально неоднородных моделей мантии для интерпретации получаемых данных.

Вторая характерная тенденция, определяемая тем, что от выяснения глубинных структур наука перейдет к уточнениям происходящих в них процессов, вероятно, будет состоять в расширении комплексного подхода, в совместной интерпретации всех релевантных данных с учетом целостности системы "кора-мантия".

Наконец, применение системного подхода к самой сейсмологии определяет еще одну основную тенденцию ее дальнейшего развития — оптимизацию систем, методов и форм организации исследований, а также перестройку всей структуры сейсмологии в результате создания новой логики обработки данных, соответствующей естественной последовательности сейсмического анализа.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ собранного материала позволяет прийти к следующим основным положениям.

1. В развитии сейсмических исследований верхней мантии и соответственно в развитии научных подходов к ее изучению намечается следующая периодизация.

1. Становление сейсмических исследований верхней мантии и однозначная трактовка ее первых скоростных моделей (1897 г. – середина–конец 20-х годов XX в.).

В эти годы: а) создается аппаратура для регистрации землетрясений, организуются первые сейсмические станции, строятся первые экспериментальные годографы; б) разрабатываются основы теории распространения сейсмических волн в недрах Земли и создается методика интерпретации экспериментальных данных; в) формулируются общие представления о строении сферически симметричной подкорковой оболочки.

Для этого периода характерна однозначная трактовка результатов сейсмических исследований мантии: каждый скоростной разрез рассматривается как более или менее точное приближение к истине. Степень соответствия реальности зависит, по мнению исследователей, лишь от точности измерений и чувствительности методов построения годографа к деталям строения мантии. Каждая последующая работа лишь уточняет глубины намеченных ранее границ или добавляет незамеченные ранее детали.

В результате такого подхода возникает представление о сферически симметричной подкорковой оболочке Земли, определяются ее верхняя и нижняя границы и внутри нее устанавливаются некоторые разделы второго рода, а также высказывается предположение о наличии в мантии пластичного слоя.

2. Классический период – зарождение представлений о возможной неоднозначности в интерпретации накопленного материала и понимание необходимости обобщения данных по всей Земле (20–50-е годы XX в.).

В это время а) улучшается аппаратура и создается сеть сейсмических станций, хотя еще редкая и неравномерная, но уже способная собирать материал, дающий представление о строении Земли в целом; б) происходит значительное накопление материалов наблюдений, их классификация. Возникающую при этом неоднозначность трактовки годографов преодолевают путем обобщения данных для получения стандартных (осредненных для всей Земли) скоростных разрезов мантии.

Основным итогом этого периода можно считать создание двух конкурирующих сейсмических моделей: с волноводом (Б. Гутенберг) и без него (Г. Джеффрис). Эти модели, по мнению их авторов, характеризуют мантию планеты в целом. Иными словами, однозначная оценка отдельных разрезов заменяется однозначной трактовкой стандартных моделей мантии. Появляются первые подтверждения ее горизонтальных неоднородностей. Однако они не получают признания, а потому не приводят к изменению взглядов на строение мантии и на способы ее изучения.

3. Современный период информационного взрыва в сейсмологии и осознания вероятностного, статистического характера представлений о мантии (с 1957 г.).

Переломным в сейсмических исследованиях верхней мантии можно считать 1957 г. – год начала работ по международным геофизическим проектам.

После МГТ, особенно во время работ по Проекту верхней мантии, в сейсмологии произошел информационный взрыв. Основные факторы резкого увеличения количества данных о мантии – расширение сети сейсмических станций и их группирование, модернизация и стандартизация аппаратуры, а также развитие сейсмологии взрывов. Помимо роста количества данных, возникает возможность извлекать больше информации из того же самого экспериментального материала, а также появляются новые типы информации о мантии. Это связано с изучением, наряду с кинематическими, динамических характеристик волн, привлечением к изучению мантии, помимо объемных, поверхностных волн и собственных колебаний Земли, развитием моделирования, изучением затухания сейсмических волн и др.

Накопление сейсмической информации влечет за собой доказательство существования волновода, установление горизонтальных неоднородностей мантии и вследствие этого понимание ограниченности стандартного годографа как основы для формирования представлений о мантии.

Для переработки резко увеличившегося объема информации используются ЭВМ, что приводит к пониманию вероятностного, статистического характера представлений о мантии, к построению ее стохастических моделей.

Попытки преодолеть возникшую неоднозначность (с помощью детальных сейсмических исследований в различных регионах, реализации комплексного подхода при оценке получаемых данных и уточнения методов решения обратной задачи сейсмологии) приводят к уточнению наиболее общих закономерностей строения мантии для планеты в целом, к выяснению конкретного проявления этих закономерностей в различных районах и к установлению их связи с типами коровых структур.

II. Можно считать ведущими следующие тенденции в дальнейшем развитии сейсмических исследований мантии: развертывание детальных работ в пределах тектонически различных структур, особенно в океанах; разработка детерминированных горизонтально неоднородных моделей мантии для интерпретации данных; расширение комплексного подхода – количественная интерпретация всей совокупности имеющихся данных с учетом целостности системы кора-мантия, применение системного подхода к самой сейсмологии в целях оптимизации методов и форм исследований, перестройка ее структуры и создание новой логики обработки данных, соответствующей сложившейся последовательности сейсмического анализа.

Есть все основания полагать, что реализация намеченных тенденций приведет к получению и осмыслению достаточно полной сейсмической информации о верхней мантии, которая послужит основой для разрешения кардинальных проблем геофизики – таких, как происхождение и направление развития материков и океанов, характер движения земной коры и их связь с процессами, происходящими в мантии. Это даст возможность предсказывать землетрясения и извержения вулканов, установить законы распределения полезных ископаемых, использовать энергетические ресурсы недр и т.д.

#### ABSTRACT

The author defines and characterises basic stages in the development of scientific approach to the upper mantle studies by seismic methods: 1) the period of univariant interpretation of the first velocity models of the mantle, which were constructed during the establishment of its seismic researches (1897 - the twenties of the XX century); 2) the classical period of seismic studies of the mantle characterised by the transition from single interpretation of each velocity cross-section to individual interpretation of standard cross-sections, generalising the data for the Earth as a whole (the twenties - the fifties of the XX century); modern period of information explosion in seismology and conception of the probability - statistical character of ideas about the mantle. The analysis of the history of changes of scientific approach to mantle studies allowed to determine the most prospective trends of their further development. The book has an almost complete bibliography of seismic studies of the upper mantle.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Азбель И.Я. Методика построения скоростного разреза верхней мантии по годографам первых вступлений и амплитудным кривым. - Канд. дисс. М., ИФЗ, 1969.
- Азбель И.Я., Кейлис-Борок В.И., Яновская Т.Б. Методика совместной интерпретации годографов и амплитудных кривых при изучении верхней мантии Земли. - В сб. "Вычислительная сейсмология, вып. 2". М., "Наука", 1966.
- Азбель И.Я., Кондорская Н.В. Об особенностях скоростных разрезов мантии по наблюдениям над землетрясениями СССР. - В сб. "Теоретическая и вычислительная геофизика, вып. 2". М., 1974.
- Азбель И.Я., Яновская Т.Б. Использование метода инверсии для определения скоростного разреза верхней мантии. - В сб. "Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн, вып. X". Л., "Наука", 1970.
- Аки К., Пресс Ф. Строение верхней мантии под океанами и континентами по наблюдениям релеевских волн. - В сб. "Верхняя мантия Земли". М., "Мир", 1964.
- Алгоритмы интерпретации сейсмических данных. - В сб. "Вычислительная сейсмология, вып. 5". М., "Наука", 1971.
- Алексеев А.С. О кинематических и динамических свойствах основных глубинных волн в случае некоторых теоретических моделей земной коры. - В сб. "ГСЗ земной коры в СССР". М., Гостоптехиздат, 1962.
- Алексеев А.С. Прямые и обратные задачи теоретической сейсмологии. - Докт. дисс. М., ИФЗ, 1966.
- Алексеев А.С. О природе волн и моделях строения земной коры по данным ГСЗ. - В сб. "Материалы Международного совещания экспертов по взрывной сейсмологии". Киев, "Наукова думка", 1969.
- Алексеев А.С., Вольвовский И.С., Ермилова Н.И., Крауклис П.В., Рябой В.З. К вопросу о физической природе некоторых волн, регистрируемых при ГСЗ. - Изв. АН СССР, серия геофиз., 1963, № 11; 1964, № 1, № 2.
- Алексеев А.С., Лаврентьев М.М., Мухометов Р.Г., Нерсесов И.Л., Романов В.Г. Методика численного исследования неоднородностей мантии Земли по сейсмологическим данным. - В сб. "Труды X Генеральной ассамблеи ЕСК, т. 1". М., 1970, с. 26-36. Ротапринт.
- Алексеев А.С., Лаврентьев М.М., Мухометов Р.Г., Романов В.Г. Численный метод решения трехмерной обратной кинематической задачи сейсмологии. - В сб. "Математические проблемы геофизики, вып. 1". Новосибирск, 1969.
- Алексеев А.С., Лаврентьев М.М., Романов В.Г., Нерсесов И.Л. Результаты изучения горизонтальной неоднородностей мантии по профилю Памир-Байкал. - В сб. "Математические проблемы геофизики, вып. 2". Новосибирск, "Наука", 1971.
- Алешин А.С. Исследование рассеяния упругих волн на твердых моделях стохастических сред. Канд. дисс. М., ИФЗ, 1972.
- Альтерман З. Высшие гармоники поверхностных волн. В сб. "Земная кора и верхняя мантия". М., "Мир", 1972.
- Андерсон Д.Л. Пластичный слой в земной мантии. - В сб. "Верхняя мантия Земли". М., "Мир", 1964.
- Андрианов З.С., Кейлис-Борок В.И., Левшин А.Л., Нейгауз М.Г. Поверхностные волны Лява. М., "Наука", 1965.
- Анизотропна ли Земля? - Земля и вселенная, 1970, № 6, 22-23.
- Антоненко А.Н., Дубровин Г.К. Строение земной коры и верхней мантии в северной части Центрального Казахстана по данным ГСЗ. - В сб. "Земная кора Казахстана", Алма-Ата, 1967. (Труды Ин-та геол. наук АН Каз ССР, 1967, 21, 3-17).
- Антоненко А.Н., Дубровин Г.К. Особенности строения верхней мантии Мугоджар. Труды Ин-та геол. наук АН Каз ССР, 1971, 30, 22-28.
- Антоненко А.Н., Попов А.А. Результаты комплексных глубинных геофизических исследований в Центральном Казахстане. - В сб. "Тезисы докладов Второго всес. со-

- вещания по изучению земной коры и верхней мантии Земли методами сейсмологии взрывов". М., 1969. Ротапринт.
- Антонова Л.В., Аптикаев Ф.Ф., Курочкина Р.И., Нерсесов И.Л., Раутиан Т.Г., Халтурин В.И. Основные экспериментальные закономерности динамики сейсмических волн. М., "Наука", 1968.
- "Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений". М., "Наука", 1966.
- Архангельская В.М. Исследование короткопериодных волн Релея. - Изв. АН СССР, серия геофиз., 1961, № 8; 1964, № 9.
- Архангельская В.М. Сессия совета по сейсмологии в Москве 5-11 мая 1964 г. - Изв. АН СССР, серия геофиз., 1964<sub>1</sub>, № 12, 1841-1848.
- Архангельская В.М., Старовойт О.Е. Некоторые результаты изучения затухания поверхностных сейсмических волн. - В сб. "Труды X Генеральной ассамблеи ЕСК, т. 1", М., 1970, с. 106-123. Ротапринт.
- Архангельская В.М., Федоров С.А. Некоторые результаты изучения затухания поверхностных волн Релея. - Изв. АН СССР, серия геофиз., 1961, № 8, 1123-1131.
- Архангельский В.Т., Кирнос Д.П., Москвина А.Г. Аппаратура и методика наблюдений на сейсмических станциях СССР. М., Изд-во АН СССР, 1962.
- Афанасьева Н.А., Булин Н.К. Определение скоростного разреза земной коры и верхней мантии по углам выхода продольных сейсмических волн. - Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1969, № 12, 36-41.
- Бабич В.М., Алексеев А.С. О лучевом методе вычисления амплитуд упругих волн. - Изв. АН СССР, серия геофиз., 1958, 2.
- Батюшкова И.В. К истории изучения землетрясений в Чехословакии. - Вопросы истории естествознания и техники, 1959, № 8.
- Батюшкова И.В. История изучения землетрясений в Болгарии. - Труды Ин-та истории естествознания и техники АН СССР (ИИЕТ), 1959<sub>1</sub>, 27.
- Батюшкова И.В. История сейсмогеологических исследований в Венгрии. - Труды ИИЕТ, 1960, 37.
- Батюшкова И.В. К истории изучения землетрясений учеными Румынии. - Труды ИИЕТ, 1960<sub>1</sub>, 37.
- Батюшкова И.В. Из истории изучения землетрясений в Польше. - Труды ИИЕТ, 1962, 42, вып. 3.
- Батюшкова И.В. Внутреннее строение Земли. М., "Наука", 1966.
- Белоносова А.В., Алексеев А.С. Об одной постановке обратной кинематической задачи сейсмологии для двумерной непрерывно неоднородной среды. - В сб. "Новые методы и алгоритмы интерпретации геофизических данных". М., "Наука", 1967.
- Белоносова А.В., Алексеев А.С. Об одном методе решения обратной кинематической задачи. - В сб. "Некоторые методы и алгоритмы интерпретации геофизических данных". Новосибирск, "Наука", 1970.
- Белоусов В.В. Проблемы внутреннего строения Земли и ее развития, ч. I - Изв. АН СССР, серия геогр. и геофиз., 1951, № 1, 3-19; ч. II - Изв. АН СССР, серия геофиз., 1951, № 2, 4-16.
- Белоусов В.В. Общие вопросы строения и развития земного шара в докладах на X Генеральной ассамблее МГТС (сент. 1954 г.). - Изв. АН СССР, серия геол., 1955, № 2, 100-105.
- Белоусов В.В. Проекты дальнейшего международного сотрудничества в изучении земного шара. - Геофиз. бюлл., № 10. М., Изд-во АН СССР, 1961.
- Белоусов В.В. Земля, ее строение и развитие. Изд-во АН СССР, 1963.
- Белоусов В.В. О некоторых задачах изучения строения и развития земной коры и верхней мантии. - Вестн. МГУ, геология 1963<sub>1</sub>, № 2, 3-12.
- Белоусов В.В. Верхняя мантия и ее влияние на развитие земной коры ("Проект верхней мантии"). - Сов. геология, 1964, № 1.
- Белоусов В.В. Вопросы строения Земли на XIII Генеральной ассамблее МГТС. - Сов. геология, 1964<sub>1</sub>, № 1, 151-156.
- Белоусов В.В. Итоги МГТ и перспективы дальнейшего международного сотрудничества. - Геофиз. бюлл., № 14. М., "Наука", 1964<sub>2</sub>.
- Белоусов В.В. Симпозиум совещания по "Проекту верхней мантии". - Геотектоника, 1965, № 3, 112-114.
- Белоусов В.В. Земная кора и верхняя мантия материков. М., "Наука", 1966.
- Белоусов В.В. Земная кора и верхняя мантия океанов. М., "Наука", 1968.
- Белоусов В.В. О связи глубинных процессов с поверхностными. - В сб. "Связь поверхностных структур земной коры с глубинными". Киев, "Наукова думка", 1971.
- Белоусов В.В. Об итогах проекта верхней мантии и задачах Геодинамического проекта. - Геофиз. бюлл., 1971<sub>1</sub>, № 24, 3-9.

- Белоусов В.В. Предисловие к сборнику "Вопросы геонии". М., Изд-во МГУ, 1972, с. 4-5.
- Беляевский Н.А. Результаты изучения внутреннего строения и термики Земли. - Изв. АН СССР, серия геол., 1968, № 7, 133-137.
- Беляевский Н.А. Карта верхней мантии территории СССР. - В сб. "Труды X Генеральной ассамблеи ЕСК, т. II". М., 1970, с. 217-253. Ротапринт.
- Беляевский Н.А. Сессия Международного комитета по верхней мантии. - Геофиз. бюл., 1971, № 22, 11-14.
- Беляевский Н.А. Новые данные о физических свойствах, составе и строении верхней мантии. - Сов. геология, 1972, № 3, 145-150.
- Беляевский Н.А., Борисов А.А., Вольвовский И.С., Лопатина Н.П., Рихтер В.Г. Новые данные о структуре земной коры территории СССР. - В сб. "Проблемы строения земной коры и верхней мантии. Верхняя мантия, № 7". М., "Наука", 1970.
- Беляевский Н.А., Вольвовский И.С. Важнейшие результаты ГСЗ в СССР за 20 лет. - В сб. "Тезисы докладов Второго Всесоюзного совещания по изучению земной коры и верхней мантии Земли методами сейсмологии взрывов". М., 1969. Ротапринт.
- Беляевский Н.А., Вольвовский И.С., Рябой В.З. Сейсмическая расслоенность коры и верхней части мантии. - В сб. "Природа сейсмических границ в земной коре". М., "Наука", 1971, с. 6-31.
- Беляевский Н.А., Вольвовский И.С., Рябой В.З. О природе сейсмических слоев и границ в земной коре. - В сб. "Методика и результаты исследований земной коры и верхней мантии. Верхняя мантия, № 8". М., "Наука", 1972.
- Беляевский Н.А., Рябой В.З. Скорости распространения продольных сейсмических волн вдоль поверхности Мохоровичича для территории СССР. - Докл. АН СССР, 1969, 186, № 2, 309-312.
- Береснев А.Р., Гайнанов А.Г., Ковылин В.М., Строев П.А. Строение земной коры и верхней мантии Японского моря и прилегающей к Японии зоны Тихого океана. В сб. "Проблемы строения земной коры и верхней мантии. Верхняя мантия, № 7". М., "Наука", 1970, с. 50-61.
- Берзон И.С. Об использовании в сейсмологии методов интерпретации волновых полей, разработанных в сейсморазведке. - Геофиз. сборник АН УССР, 1966, вып. 15, 59-69.
- Берзон И.С., Вейцман П.С. Строение коры и верхней части мантии по геофиз. данным. - В сб. "Итоги науки", серия "Геофизика", 1962. М., ВИНТИ, 1964, с. 80-100.
- Берзон И.С., Епинатьева А.М., Парийский Г.Н., Стародубровская С.П. Динамические характеристики сейсмических волн в реальных средах. М., Изд-во АН СССР, 1962.
- Берри М.Д. Сейсмические исследования земной коры в Канаде. - В сб. "Материалы Международного совещания экспертов по взрывной сейсмологии". Киев, "Наукова думка", 1969.
- Бессонова Э.Н. Решение обратной задачи геометрической сеймики  $\tau(p)$  - методом по дискретному годографу. - Канд. дисс. М., ИФЗ, 1974.
- Бессонова Э.Н., Джонсон Л.Р., Ситникова Г.А., Фишман В.М. Решение обратной задачи сейсмологии методом  $\tau(p)$  - В сб. "Вычислительная сейсмология, вып. 7". М., "Наука", 1974.
- Бессонова Э.Н., Рябой В.З., Ситникова Г.А., Фишман В.М. Решение обратной кинематической задачи ГСЗ методом  $\tau(p)$ . - В сб. "Вычислительная сейсмология, вып. 6". М., "Наука", 1973.
- Бессонова Э.Н., Рябой В.З., Ситникова Г.А., Фишман В.М. Интерпретация дискретных годографов рефрагированных волн в случае горизонтально однородной среды. - Экспресс-информация ВИАМС МГ СССР. Серия "Региональная, разведочная и промысловая геофизика", 1973, № 21.
- Бессонова Э.Н., Ситникова Г.А., Фишман В.М. Новый метод интерпретации годографов рефрагированных волн (метод  $\tau(p)$ ). - Докл. АН СССР, 1973, 211, № 4.
- Болдырев С.А. Спектральные характеристики упругих волн от близких землетрясений и поглощающие свойства верхней мантии под группой камчатских вулканов. - В сб. "Вулканизм, гидротермы и глубины Земли". Петропавловск-Камчатский, 1969.
- Болдырев С.А. Спектры близких Курило-Камчатских землетрясений и использование их для изучения свойств коры и верхней мантии. Автореф. канд. дисс. М., ИФЗ, 1970.
- Борисов А.А. Морфология поверхности Мохоровичича и ее структурное значение. - Сов. геология, 1964, № 4.
- Борисов А.А. Глубинная структура территории СССР по геофизическим данным. М., "Недра", 1967.

- Борисевич Е.С., Кирнос Д.П., Харин Д.А. Развитие сейсмических наблюдений и сейсмической аппаратуры в СССР. - Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1967, № 11, 41-53.
- О'Брайен П. Вопросы методики взрывной сейсмологии. - В сб. "Материалы Междунар. совещания экспертов по взрывной сейсмологии". Киев, "Наукова думка", 1969.
- Брюн Д.Н. Поверхностные волны и строение коры. - В сб. "Земная кора и верхняя мантия". М., "Мир", 1972.
- Бугаевский Г.Н. К вопросу о внутреннем строении оболочки Земли. - Бюлл. Совета по сейсмологии, 1957, № 6, 63-66.
- Бугаевский Г.Н. Метод параболической аппроксимации для определения производной эмпирической функции. - Труды Иркутского гос. ун-та, серия физ.-мат., 1957<sub>1</sub>.
- Бугаевский Г.Н. К вопросу о строении оболочки Земли. - Бюлл. Совета по сейсмологии, 1957<sub>2</sub>, № 6, 63-66.
- Бугаевский Г.Н. Некоторые выводы о строении оболочки Земли из годографов Джеффриса. - Геология и геофизика, 1960, № 5, 97-102.
- Бугаевский Г.Н. О природе границ раздела в оболочке и годографе продольных волн. - Геология и геофизика, 1960<sub>1</sub>, № 7, 117-126.
- Бугаевский Г.Н. Годограф сейсмических волн и неоднородность строения оболочки Земли. - Канд. дисс. Иркутск, 1960<sub>2</sub>.
- Бугаевский Г.Н. Выявление неоднородностей строения мантии Земли с помощью годографов прямых сейсмических волн. - Бюлл. Совета по сейсмологии, № 15, 1963, 60-71.
- Бугаевский Г.Н. Годограф сейсмических волн и строение мантии. - В сб. "Вопросы сейсмичности Сибири". Труды Ин-та земной коры, вып. 18, 1964.
- Бугаевский Г.Н. Определение ориентировки фронта сейсмической волны. - Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1968, № 8.
- Бугаевский Г.Н. Изучение элементов рельефа сейсмических границ раздела. - В сб. "Труды X Генеральной ассамблеи ЕСК, т. 1", М., 1970, 254-267. Ротапринт.
- Бугаевский Г.Н. Горизонтальные неоднородности строения мантии в районе Центральной Азии. - В сб. "Геология и геофизика Восточной Сибири, № 2". Иркутск, 1971, с. 77-84.
- Бугаевский Г.Н., Нерсесов И.Л., Рогожина В.А. Горизонтальные неоднородности верхней мантии в Центральной Азии. - Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1971, № 6, 21-27.
- Бугаевский Г.Н., Рогожина В.А. Изучение строения верхней мантии в зоне Центральной Азии. - Информ. бюлл. Ин-та земной коры СО АН СССР. Иркутск, 1967-1968 (1970), с. 61-63.
- Булин Н.К. Некоторые данные о строении подкорового слоя на территории Туркмении. - Бюлл. МОИП, т. 68, Отдел геол., т. 38, вып. 1, 1963, с. 31-40 с картой.
- Булин Н.К. Строение верхней части подкорового слоя на территории Туркмении по данным обменных волн землетрясений. - В сб. "Сейсмические исследования, № 6". М., "Наука", 1965, с. 84-90.
- Булин Н.К. Динамические характеристики глубинных сейсмических волн  $P_S$  Средней Азии. - Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1967, № 6.
- Булин Н.К. Глубинное строение территории Туркмении по данным сейсмол. исследований. - Геотектоника, 1967<sub>1</sub>, № 6, 70-81.
- Булин Н.К., Афанасьева Н.А., Проняева Е.А., Эрглис Е.И. Сравнительный анализ строения земной коры и верхней мантии в пределах некоторых сейсмоактивных районов СССР. - В сб. "Геофизические поля и сейсмичность". М., "Наука", 1975.
- Булин Н.К., Сытин Ю.И. Опыт применения сейсмологических исследований для изучения глубинного строения земной коры на территории Туркмении. - Труды ВСЕГЕИ, новая серия, 1960<sub>1</sub>, 42, вып. 1.
- Буллен К. Сейсмология и внутреннее строение Земли в целом. - В сб. "Физика и химия Земли". М., ИЛ, 1958.
- Буллен К.Э. Глубокие недра Земли. - В сб. "Планета Земля", М., ИЛ, 1961.
- Буллен К. Введение в теорию сейсмологии. М., "Мир", 1966.
- Бунэ В.И., Гзовский М.В., Запольский К.К., Кейлис-Борок В.И., Крестников В.Н., Малиновская Л.Н., Нерсесов И.Л., Павлова Г.И., Раутиан Т.Г., Рейснер Г.И., Ризниченко Ю.В., Халтурин В.И. Методы детального изучения сейсмичности. Под ред. Ю.В. Ризниченко. - Труды ИФЗ АН СССР, 1960, № 9 (176).
- Бурмаков Ю.А., Облогина Т.И. Сейсмические лучи и годографы в трехмерно неоднородных средах. - Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1971, № 1.
- Бурмаков Ю.А., Рябой В.З. Определение по материалам ГСЗ скоростного разреза верхней части мантии при наличии горизонтальных неоднородностей среды. - В сб. "Вычислительная сейсмология, вып. 6". М., "Наука", 1973.

- Бурмаков Ю.А., Рябой В.З., Старшинова Е.А. Построение двумерной скоростной модели верхней части мантии Черноморской впадины методом ГСЗ. — Тезисы докладов сессии Секции сейсмологии МСССС. М., май, 1973.
- Бутовская Е.И., Уломов Б.И. Годографы сейсмических волн и некоторые особенности строения земной коры в Средней Азии по данным мощных взрывов. — В сб. "ГСЗ земной коры в СССР". Л., Гостоптехиздат, 1962.
- Валюс В.П. Определение сейсмических разрезов по совокупности наблюдений (методы перебора). — В сб. "Вычислительная сейсмология, вып. 4". М., "Наука", 1968.
- Валюс В.П. Определение скоростных разрезов Земли по совокупности наблюдений. Канд. дисс. М., ИФЗ, 1969.
- Валюс В.П., Галкин И.Н., Левшин А.Л. Решение обратной задачи ГСЗ на ЭВМ. — В сб. "Тезисы докладов на Втором всесоюзном совещании по изучению земной коры и верхней мантии Земли методами сейсмологии взрывов". М., 1969, Ротапринт.
- Валюс В.П., Галкин И.Н., Левшин А.Л. Решение обратной задачи ГСЗ на ЭВМ по годографу и амплитудной кривой. — В сб. "Вычислительная сейсмология, вып. 5". М., "Наука", 1971.
- Валюс В.П., Кейлис-Борок В.И., Левшин А.Л. Определение скоростного разреза верхней мантии Европы. — Докл. АН СССР, 1969, 185, № 3, 564-567.
- Валюс В.П., Кейлис-Борок В.И., Левшин А.Л. Определение скоростей поперечных волн верхней мантии Европы. — В сб. "Вычислительная сейсмология, вып. 5". М., "Наука", 1971, с. 214-237.
- Ванек И. Скорости волн в верхней мантии и ее строение в Евразии. — В сб. "Земная кора и верхняя мантия". М., "Мир", 1972.
- Ванек И.В. Сейсмические модели верхней мантии. — В сб. "Земная кора и верхняя мантия". М., "Мир", 1972.
- Ванек И., Штельцнер И. Амплитуды объемных сейсмических волн. — В сб. "Верхняя мантия". М., "Мир", 1964, с. 184-211.
- Вашилов Ю.Я. Методика интерпретации при геофизических исследованиях строения верхней мантии и земной коры Западно-Сибирской низменности. — Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1970, № 12, 45-60.
- Вашилов Ю.Я. Структура верхней мантии и земной коры Западно-Сибирской низменности. — Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1971, № 1, 51-64.
- Вашилов Ю.Я. Блоково-слоистая структура земной коры и верхней мантии и представления об астеносфере. — В сб. "Изостазия". М., "Наука", 1973, с. 31-44.
- Вашилов Ю.Я., Гайнанов А.Г. Особенности распространения плотностных неоднородностей в земной коре и верхней мантии. — В сб. "Третья научная отчетная конференция геол. ф-та МГУ" (1966). Тезисы докл. М., 1968, Ротапринт.
- Вашилов Ю.Я., Гайнанов А.Г. Об особенностях блоковой структуры океанической коры и мантии. — В сб. "Материалы II и III научно-технической конференции молодых геофизиков Украины 1966-1968". Киев, 1968, 1.
- Вашилов Ю.Я., Гайнанов А.Г. Плотностные неоднородности земной коры и верхней мантии. В сб. "Методика и результаты исследований земной коры и верхней мантии. Верхняя мантия, № 8". М., "Наука", 1972.
- Вашилов Ю.Я., Попов М.Г. Блоковая структура земной коры и верхней мантии акваторий Каспийского, Черного и Средиземного морей. — В сб. "IV научная отчетная конференция геол. фак-та МГУ, 1969". Тезисы докладов. М., 1969, с. 9-10.
- Введенская А.В., Балакина Л.М. О некоторых особенностях поля смещений продольных и поперечных волн, распространяющихся в оболочке Земли. — Бюлл. Совета по сейсмологии, 1957, № 6, 59-62.
- Введенская А.В., Балакина Л.М. О некоторых особенностях поля смещений продольных и поперечных волн, распространяющихся в оболочке Земли. — Изв. АН СССР, серия геофиз., 1957, 1, № 8, 1052-1054.
- Введенская А.В., Балакина Л.М. Двойное лучепреломление в оболочке Земли. — Изв. АН СССР, серия геофиз., 1959, № 8.
- Вейцман П.С. Особенности глубинного строения Курило-Камчатской зоны. — Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1965, № 9.
- Вейцман П.С. Строение коры и верхней части мантии по геофизическим данным. — В сб. "Итоги науки", серия "Геофизика", 1966, М., ВИНТИ. 1968, с. 284-343.
- Вейцман П.С., Гальперин Е.И., Косминская И.П., Вольвовский Б.С., Годин Ю.Н., Иванова Н.П., Померанцева И.В. Методика ГСЗ на суше и на море. — В сб. "ГСЗ земной коры в СССР". Гостоптехиздат, 1962.
- Вейцман П.С., Косминская И.П. Районы специальных сейсмологических исследований в период МТГ и МГС. — В сб. "Сейсмические исследования, № 5". М., Изд-во АН СССР, 1964.

- Сб. "Верхняя мантия Земли". Под ред. Ю.В. Ризниченко. М., "Мир", 1964.
- Весанен Е., Нурмиа М., Поркка М.Г. Новые доказательства существования астеносферного канала Гутенберга. - В сб. "Верхняя мантия". М., "Мир", 1964.
- Вилькович Е.В., Левшин А.Л., Нейгауз М.Г. Волны Лява в вертикально неоднородной среде. - В сб. "Вычислительная сейсмология, вып. 2". М., "Наука", 1966.
- Винник Л.П. Рассеяние продольных волн в верхней мантии. - Докл. АН СССР, 1973, 211, № 6, 1326-1329.
- Винник Л.П., Годзиковская А.А. Зондирование мантии методом сейсмоки сопряженных точек. - Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1972, № 10, 15-28.
- Винник Л.П., Лукк А.А. Скоростные неоднородности верхней мантии в Средней Азии. - Докл. АН СССР, 1973, 213, № 3, 580-583.
- Винник Л.П., Лукк А.А. Латеральные неоднородности верхней мантии под Памиро-Гиндукушем. - Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1974, № 1, 9-22.
- Винник Л.П., Николаев А.В. Микроструктура годографа продольной волны. - Докл. АН СССР, 1969, 186, № 3.
- Винник Л.П., Николаев А.В. Микроструктура годографа продольной волны. - В сб. "Труды X Генеральной ассамблеи ЕСК, т. 1", М., 1970, с. 48. Ротапринт.
- Вихерт Э. Что мы знаем о Земле под нами? В кн. "Сборник рефератов и переводных статей по геодез. вопросам, т. 6. Приложение к 66-й части записок военно-топограф. отдела Главного упр. Ген. Штаба". СПб., 1911.
- Владимиров Б.М., Зорин Ю.А., Одинцов М.М., Хренов П.М. О глубинном положении кровли астеносферного слоя под платформами и подвижными поясами. - Докл. АН СССР, 1969, 185, № 4, 877-879.
- "Внутреннее строение Земли". Под ред. Б. Гутенберг. М., ИЛ, 1949.
- Вольвовский Б.С., Вольвовский И.С. Глубинные сейсмические разрезы территории СССР, М., 1975.
- Вольвовский Б.С., Вольвовский И.С., Таль-Вирский Б.Б., Пак В.А. Земная кора Средней Азии. - В сб. "Тезисы докладов Второго всесоюзного совещания по изучению земной коры и верхней мантии методами сейсмологии взрывов". М., 1969. Ротапринт.
- Вольвовский Б.С., Вольвовский И.С., Таль-Вирский Б.Б., Шрайбман В.И. Строение земной коры и верхней мантии основных геоструктурных зон запада Средней Азии. - В сб. "Геологические результаты прикл. геофизики". М., "Недра", 1964.
- Вольвовский Б.С., Вольвовский И.С., Рябой В.З. Некоторые данные о сейсмических волнах, соответствующих подкоровому слою. - В сб. "Прикладная геофизика", вып. 31, 1961, с. 3-10.
- Вольвовский Б.С., Силкин Б.И. Твердая оболочка Земли и землетрясения. - Природа, 1972, № 6, 34-39.
- Вольвовский И.С. Скорости сейсмических волн в земной коре и верхней мантии территории СССР. - В сб. "Глубинные сейсмические зондирования". Алма-Ата, "Наука", 1973, с. 28-42.
- Вольвовский И.С. Сейсмические исследования земной коры в СССР. М., "Недра", 1973<sub>1</sub>.
- Вознесенский А.В. Письмо в Совет Императорского Русского географического общества. - Приложение к IV журналу "Известия Импер. Русского Геогр. Об-ва", 1898, 34, 465.
- "Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн, № 1". Л., Гостоптехиздат, 1957.
- "Вопросы метроидики ГСЗ". Пер. с англ. и нем. Новосибирск, 1972.
- Сб. "Вопросы сейсмической разведки", М., ИЛ, 1953.
- Гайнанов А.Г. Плотностная неоднородность верхней мантии. - Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1966, № 10, 30-39.
- Гайнанов А.Г. Строение земной коры и верхней мантии океанов. - В сб. "Кора и верхняя мантия". М., "Наука", 1968, 42-51.
- Гайнанов А.Г. Строение земной коры и верхней мантии переходных зон от материков к океанам. - Вестн. МГУ, отд. геол., 1968<sub>1</sub>, № 3, 17-26.
- Гайнанов А.Г., Тулина Ю.В., Косминская И.П., Зверев С.М., Вейцман П.С., Соловьева О.Н. Комплексная интерпретация материалов геофизических наблюдений в Охотском море и Курило-Камчатской зоне Тихого океана. - В сб. "Сейсмические исследования, № 6". М., "Наука", 1965, с. 60-65.
- Галкин И.Н. Построение сейсмической модели земной коры. М., "Наука", 1972.
- Галкин И.Н., Николаев А.В. Опыт исследования мутности земной коры и верха мантии по амплитудам преломленных волн. - Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1968, № 8, 36-47.

- Галкин И.Н., Николаев А.В., Старшинова Е.А. Флуктуация волновых характеристик и мелкая неоднородность земной коры. Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1970, № 11.
- Гамбурцев Г.А. Глубинное сейсмическое зондирование земной коры. - Докл. АН СССР, 1952, 87, № 6.
- Гамбурцев Г.А. Глубинное сейсмическое зондирование земной коры. - Труды Геофиз. ин-та АН СССР, 1954, № 25, 124-133.
- Гамбурцев Г.А. Основы сейсморазведки. М., Гостоптехиздат, 1959.
- Гамбурцев Г.А. Избранные труды. Изд-во АН СССР, 1960.
- Гамбурцев А.Г., Вейцман П.С., Тулина Ю.В. Строение земной коры в районе Северного Тянь-Шаня по данным ГСЗ. - Докл. АН СССР, 1955, 105, № 1, 83-85.
- Гельчинский Б.Я. Постановка задач на распространение волн в средах с эффективными случайными параметрами. - В сб. "Асимптотические методы и стохастические модели в задачах распространения волн". Труды МИАН СССР, ХСУ.Л., "Наука", 1968.
- Гельчинский Б.Я. Некоторые задачи теории распространения и методы интерпретации сейсмических объемных волн. Докт. дисс. М., ИФЗ, 1970.
- "Геология и геофизика Тихоокеанского пояса". Ново-Александровск, 1970. (Труды СахКНИИ, вып. 25).
- "Геофизические исследования строения земной коры и верхней мантии в зоне перехода от Азиатского материка к Тихому океану". Южно-Сахалинск, 1970 (Труды СахКНИИ, вып. 24, геофиз. сб. № 2).
- "Геофизические исследования строения земной коры Юго-Восточной Европы. Верхняя мантия, № 5". М., 1967.
- Гервер М.Л., Маркушевич В.М. Исследование неоднородности при определении по годографу скорости распространения сейсмической волны. - Докл. АН СССР, серия физ.-мат., 1965, 163, № 4, 5, 6.
- Гервер М.Л., Маркушевич В.М. Определение по годографу скорости распространения сейсмической волны. - В сб. "Вычислительная сейсмология, вып. 3". М., "Наука", 1967.
- Гервер М.Л., Маркушевич В.М. Свойства годографа от поверхностного источника. - В сб. "Вычислительная сейсмология, вып. 4". М., "Наука", 1968.
- Глубинное сейсмическое зондирование. - Материалы II Всес. совещания по изучению коры и верхней мантии Земли методами сейсмологических взрывов. Алма-Ата, "Наука", 1973.
- Глубинное сейсмическое зондирование земной коры. - В сб. "ГСЗ в СССР". Л., Гостоптехиздат, 1962.
- Голенецкий С.И., Медведева Г.Я. О границах первого рода в верхней мантии. - Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1965, № 5, 57-62.
- Голикова Г.В. Исследование динамики продольных рефрагированных волн в моделях верхней мантии Земли. - Автореф. канд. дисс. Л., 1965.
- Голикова Г.В. Некоторые вопросы использования динамики Р-волн для нахождения скоростного разреза верхней мантии. - В сб. "Вычислительная сейсмология, вып. 2". М., "Наука", 1966.
- Голицын Б.Б. Лекции по сейсмометрии. Спб., 1912.
- Голицын Б.Б. Избранные труды, т. II Сейсмология. Изд-во АН СССР, 1960.
- Горшков Г.С. О глубине магматического очага Ключевского вулкана. - Докл. АН СССР, 1956, 101, № 5.
- Горшков Г.С. Некоторые вопросы теории вулканологии. - Изв. АН СССР, серия геол., 1958, № 11.
- Горшков Г.С. On some theoretical problems of volcanology. - Bull. volcanol., ser. II, 1958, 19, № 26, 103.
- Гурарий Г.З., Соловьева И.А. Предварительные данные о плотности вещества земной мантии. - Докл. АН СССР, 1962, 146, № 4, 877-880.
- Гурарий Г.З., Соловьева И.А. Строение земной коры по геофиз. данным. - Труды ПИН АН СССР, вып. 98, М., 1963.
- Гурарий Г.З., Соловьева И.А. Некоторые данные о строении земной коры и плотности вещества мантии Земли. - Тезисы докл. конф. МГУ. М., 1963.
- Гурарий Г.З., Соловьева И.А. Некоторые данные о строении верхней мантии Земли и общая схема изостазии. - В сб. "Изостазия". М., "Наука", 1964.
- Гуревич И.И. Сейсмическая разведка. М., Гостоптехиздат, 1960.
- Гуревич И.И. Сейсморазведка. Учебник для геол.-развед. техникумов. М., 1964.
- Гутенберг Б. Строение Земли. М.-Л., ОНТИ, 1935 (1934).
- Гутенберг Б. Основы сейсмологии. М.-Л., 1935.
- Гутенберг Б. Скорости распространения сейсмических волн в земной коре. - В кн. "Земная кора". М., ИЛ, 1957.

- Гутенберг Б. Физика земных недр. Под ред. Ю.В. Ризниченко. М., ИЛ, 1963.
- Гутенберг Б., Рихтер К. Сейсмичность Земли. М., ИЛ, 1948.
- Дараган С.К., Осадчий А.П. Импульсная калибровка и контроль сейсмического канала. - В сб. "Вычислительная сейсмология, № 3". М., "Наука", 1967.
- Деменицкая Р.М. Кора и мантия Земли. М., "Недра", 1967.
- Деменицкая Р.М. Строение земной коры и верхней мантии территории СССР и новые проблемы в ее изучении. - В сб. "Геологическое строение СССР, т. 5". М., "Недра", 1969.
- Джекобс Дж. А., Рассел Р.А., Уилсон Дж. Г. Физика и геология. М., "Мир", 1964.
- Джеффрис Г. Земля, ее происхождение, история и строение. М., ИЛ, 1960.
- Дорман Д. Данные о поверхностных волнах и верхняя мантия. - В кн. "Земная кора и верхняя мантия". М., "Мир", 1972.
- Дружинин В.С., Крылов С.В., Мишенькин Б.П., Пузырев Н.Н., Рудницкий А.Л., Рыбалка В.М., Халевин Н.И. Строение земной коры и верхов мантии по профилю Ижевск-Ишим-Ханты-Мансийск-Енисейск-Братск. - В сб. "Проблемы строения земной коры и верхней мантии. Верхняя мантия, № 7". М., "Наука", 1970, с. 125-130.
- Жарков В.Н. О слое пониженных скоростей и адиабатическом градиенте температур в оболочке Земли. - Изв. АН СССР, серия геофиз., 1964, № 9.
- Зайцев Л.П. Исследование земной коры и верхней мантии. - Вестн. АН СССР, 1964, № 2, 118-119.
- Зайцев Л.П., Саваренский Е.Ф. Внутреннее строение Земли. - В сб. "Итоги науки", серия "Геофизика", 1963. М., ВИНТИ, 1965, с. 274-305.
- Залесский Б., Синяков И. На конференции "Проекта верхней мантии". - Изв. АН СССР, серия геол., 1963, № 5, 117-120.
- Затопок А. Современные направления Европейской сейсмологии. - В сб. "Геофизические исследования строения земной коры Юго-Восточной Европы. Верхняя мантия, № 5". М., "Наука", 1967.
- Зверев С.М. ГСЗ на море. - В сб. "Материалы Международного совещания экспертов по взрывной сейсмологии". Киев. "Наукова думка", 1969.
- Зверев С.М. Проблемы сейсмических исследований земной коры океанов. - Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1970, № 4, 49-64.
- Зверев С.М. Тонкая структура верхней мантии некоторых участков Тихого океана по данным ГСЗ. - В сб. "Проблемы строения земной коры и верхней мантии. Верхняя мантия, № 7". М., "Наука", 1970, с. 74-82.
- Зверев С.М. Глубинное сейсмическое зондирование на море. - Автореф. докт. дисс. М., ИФЗ, 1973.
- Зверев С.М., Тулина Ю.В. Особенности слоисто-блоковой структуры коры и верхней мантии северо-западного обрамления Тихого океана. - В сб. "Тезисы докладов Второго всесоюзного совещания по изучению земной коры и верхней мантии методами сейсмологии взрывов". М., 1969, Ротапринт.
- "Землетрясения и глубинное строение юга Курильской островной дуги". М., "Наука", 1968.
- "Земная кора". М., ИЛ, 1957.
- "Земная кора и верхняя мантия". М., "Мир", 1972.
- Зорин Ю.А. Новейшая структура и изостазия Байкальской рифтовой зоны и сопредельных территорий. М., "Наука", 1971.
- Зорин Ю.А., Новоселова М.Р. Изучение Байкальской рифтовой зоны методами разведочной геофизики. - В сб. "Геофизические поля и сейсмичность". М., 1975.
- Ивакин Б.Н., Капцан А.Д. Моделирование волноводного астеносферного слоя с внутренними неоднородностями. - Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1968, № 4.
- Изучение верхней мантии и ее влияния на развитие земной коры. - Геофиз. бюлл., № 10, 1961, с. 34-38.
- Изучение внутреннего строения Земли по сейсмическим данным. Отв. ред. Е.Ф. Саваренский. М., Изд-во АН СССР, 1963.
- Иосиф Т. Определение скоростей сейсмических волн в оболочке Земли по данным глубоких Карпатских землетрясений и их механизм. - Автореф. канд. дисс., М., 1964.
- Исследование верхней мантии Земли. - Природа, 1966, № 2, 121-122.
- Калашников А.Г. Гесмагнитное поле, связь его со строением Земли и происходящими в ней процессами. - Труды Геофиз. ин-та АН СССР, 1955, № 6.
- Капустинский А.Ф. О внутреннем строении земного шара. - Бюлл. МОИП, отд. геол., 1958, т. XXXIII, вып. 4.
- Капцан А.Д. Исследование волновода с нерезкими границами на двумерных дырчатых моделях. - Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1966, № 6.

- Капцан А.Д., Кисловская В.В. О фокусировке энергии в астеносферном слое. — Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1966, № 7.
- Кейлис-Борок В.И. Интерференционные поверхностные волны. Изд-во АН СССР, 1960.
- Кейлис-Борок В.И. Применение вычислительных методов в излучении верхней мантии. — Вестн. АН СССР, 1964, № 9, 88-89.
- Кейлис-Борок В.И. Использование ЭВМ при изучении строения и развития Земли. — Изв. АН СССР, серия геол., 1967, № 1, 3-10.
- Кейлис-Борок В.И. Сейсмология и логика. — В сб. "Вычислительная сейсмология, вып. 4". М., "Наука", 1968.
- Кирнос Д.П. Развитие отечественных инструментальных сейсмических наблюдений. — Бюлл. Совета по сейсмологии, 1957, № 6, 9-15.
- Кирнос Д.П., Харин Д.А., Шебалин Н.В. История развития инструментальных сейсмических наблюдений в СССР. — В сб. "Землетрясения в СССР". М., Изд-во АН СССР, 1961, с. 9-66.
- Клосс Х. ГСЗ в Западной Европе. — В сб. "Земная кора и верхняя мантия". М., 1972.
- Кнопов Л. Затухание сейсмических волн в мантии. — В кн. "Земная кора и верхняя мантия". М., "Мир", 1972.
- Коган С.Д. О существовании глубинной фокальной поверхности на границе Тихого океана. — Докл. АН СССР, 1955, 101, № 1.
- Коган С.Д. Времена пробега продольных и поперечных волн, вычисление по данным ядерных взрывов, произведенных в районе Маршалловых островов. — Изв. АН СССР, серия геофиз., 1960, № 3, 371-380.
- Колесников Ю.А., Соловьев В.Н. Установка для цифрования сейсмограмм с автоматическим нанесением чисел на перфокарты и бумажную ленту. — В сб. "Новые приборы для регистрации сейсмич. явлений". М., "Наука", 1964.
- Колесников Ю.А., Соловьев В.Н. Прибор для построения графиков с перфокарт. — В сб. "Аппаратура и методика сейсмических наблюдений". М., "Наука", 1966.
- "Комплексные геофизические исследования территории Украины, вып. 4". Киев, 1963.
- Кондорская Н.В. По поводу региональных особенностей времен пробега сейсмических волн. — Изв. АН СССР, серия геофиз., 1957, № 7.
- Кондорская Н.В. О совещании Комитета по междунар. сейсмол. сводке. — Информ. бюлл. МГТ, 1962, № 12, 10-13.
- Кондорская Н.В. Отчет о научной командировке в Великобританию для участия в совещании Исполнительного Комитета МСЦ и работы в этом центре (21 апреля-21 мая 1971 г.). М., 1971, Фонды МГК.
- Кондорская Н.В., Аранович З.И. О принципах организации оптимальной системы сейсмических наблюдений. — В сб. "Труды X Генеральной ассамблеи ЕСК, т. II". М., 1970.
- Кондорская Н.В., Аранович З.И. Методические основы оптимизации систем сейсмических наблюдений. — Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1971, № 7, 14-30.
- Кондорская Н.В., Павлова Л.Н., Тараканов Р.З., Ким Чун-Ун. О годографе сейсмических волн от дальневосточных землетрясений. — Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1973, № 5.
- Кондорская Н.В., Славина Л.Б. Некоторые результаты изучения времен пробега продольных волн. — Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1969, № 2, 19-36.
- Коридалин Е.А. Общая сейсмология. — В сб. "Итоги науки", серия геофизика, 1962. М., ВИНТИ, 1964, с. 100-135.
- Коридалин Е.А. Сейсмологические исследования. — В сб. "Итоги науки", серия "Геофизика". М., ВИНТИ, 1965, с. 326-361.
- Коридалин Е.А. Международные связи по сейсмологии. — Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1966, № 7, 92-95.
- Коридалин Е.А. Сейсмологические исследования. — В сб. "Итоги науки", серия "Геофизика", 1968. М., 1969.
- Косминская И.П. Изучение земной коры в период МГТ. — В сб. "Сейсмические исследования, № 5". М., Изд-во АН СССР, 1963.
- Косминская И.П. Вопросы глубинного сейсмического зондирования земной коры и верхней мантии на VII Совещании геофизиков Европейско-Азиатского региона (М., июнь 1964 г.). — Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1965, № 6, 91-95.
- Косминская И.П. Развитие основ метода ГСЗ земной коры и верхов мантии. М., "Наука", 1966.
- Косминская И.П. Современные проблемы ГСЗ. — Геофиз. сб. АН УССР, 1966, вып. 15, 34-45.
- Косминская И.П. Современные сейсмические данные об океанической и континентальной коре. — Бюлл. МОИП, отдел геол., 1967, 42, № 5, 8-17.

- Косминская И.П. Метод ГСЗ земной коры и верхов мантии. Развитие основ метода. М., "Наука", 1968.
- Косминская И.П. Корреляция волн, особенности волновых полей, модели коры. - В сб. "Материалы Междунар. совещания экспертов по взрывной сейсмологии". Киев, "Наукова думка", 1969.
- Косминская И.П., Беляевский Н.А., Вольвовский И.С. Сейсмология взрывов в СССР. - Геофиз. бюлл., 1969, № 20, 7-14.
- Косминская И.П., Зверев С.М. Проблемы сейсмических исследований в зонах перехода от континентов к океанам. - В сб. "Строение и развитие земной коры на Советском Дальнем Востоке". М., "Наука", 1969.
- Косминская И.П., Зверев С.М., Вейцман П.С., Тулина Ю.В., Гайнанов А.Г., Соловьев О.Н. Некоторые результаты комплексной интерпретации материалов геофизических наблюдений в Охотском море и Курило-Камчатской зоне Тихого океана. - Тезисы докл. конф. МГГ. М., 1963.
- Косминская И.П., Зверев С.М., Вейцман П.С., Тулина Ю.В., Кракшина Р.М. Основные черты строения Охотского моря и Курило-Камчатской зоны Тихого океана по данным ГСЗ. - Изв. АН СССР, серия геофиз., 1963, № 1.
- Косминская И.П., Павленкова Н.И. Волновые поля и модели коры. - В сб. "Тезисы докладов Второго всесоюзного совещания по изучению земной коры и верхней мантии Земли методами сейсмологии взрывов". М., 1969, Ротапринт.
- Косминская И.П., Пузырев Н.Н. Методические проблемы ГСЗ. - В сб. "ГСЗ". Алма-Ата, 1973, с. 42-52.
- Косминская И.П., Пузырев Н.Н., Алексеев А.С. Сейсмология взрывов, ее прошлое, настоящее и будущее. - Вестн. АН СССР, 1972, № 9, 44-54.
- Косминская И.П., Шейнман Ю.М. Особенности строения земной коры предгорных и межгорных прогибов. - Бюлл. МОИП, отдел геол., 1965, № 4.
- Кравченко А.Г. Сбор в мировых центрах данных материалов наблюдений по Проекту верхней мантии. - Геофиз. бюлл., 1966, № 17, 111-115.
- Крылов С.В. ГСЗ в Сибири. - Автореф. докт. дисс. Новосибирск, 1971.
- Крылов С.В., Мишенькин Б.П., Янушевич Т.А., Крупская Г.В. Вопросы методики ГСЗ при изучении континентальных рифтов и первые результаты работ в Байкальской зоне. - В сб. "Тезисы докладов Второго всесоюзного совещания по изучению земной коры и верхней мантии методами сейсмологии взрывов". М., 1969, Ротапринт.
- Кузин И.П. Фокальная зона и особенности строения верхней мантии в районе Восточной Камчатки. - Канд. дисс. М., ИФЗ АН СССР, 1971.
- Кузин И.П. Скорости упругих волн в фокальной зоне Камчатки. - Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1972, № 12.
- Лебедев Т.С., Корниен Д.В. Исследования верхней мантии в СССР. - Геофиз. сб. АН УССР, 1963, вып. 4(6), 112-123.
- Левый Н.В. О статистической значимости экстремумов  $E_{\max} = f(h)$  для землетрясений Тихоокеанского кольца за 68 лет (1897-1964). - Фонды СахКНИИ.
- Левшин А.Л. Волны Лява и слой пониженной скорости в верхней мантии. - Изв. АН СССР, серия геофиз., 1964, № 11.
- Левшин А.Л. Вопросы теории и интерпретации поверхностных сейсмических волн. - Докт. дисс., М., 1970.
- Левшин А.Л. Поверхностные и каналовые сейсмические волны. М., "Наука", 1973.
- Левшин А.Л., Французова В.И., Шкадинская Г.В. Высшие гармоники релеевских волн и строение верхней мантии. - Сб. "Вычислительная сейсмология, вып. 4". М., "Наука", 1963.
- Леман И. Волны S и структура верхней мантии. - В сб. "Верхняя мантия Земли". М., "Мир", 1964.
- Литвиненко И.В. Строение земной коры восточной части Балтийского щита. - В сб. "Геологические результаты прикладной геофизики". Докл. сов. геологов на XXII сессии Междунар. геол. конгресса. М, "Недра", 1965.
- Литвиненко И.В. О некоторых результатах изучения глубинных разрезов земной коры различных структурно-фациальных зон Кольского полуострова и Карелии. В кн.: "Геология и глубинное строение восточной части Балтийского щита". Л., 1968, с. 185-190.
- Лопатина Н.П., Рябой В.З. Скоростные и плотностные неоднородности верхней части мантии территории СССР. - Докл. АН СССР, 1972, 207, № 2.
- Лопатина Н.П., Рябой В.З. Скоростные неоднородности верхней мантии и глубинные аномалии силы тяжести территории СССР. - В.Сб. "Физические свойства, состав и строение верхней мантии". М., "Наука", 1974.
- Лукк А.А. Глубинное строение верхней мантии Земли по объемным волнам от землетрясений с промежуточной глубиной очага. - Канд. дисс. Гарм, 1965.

- Лукк А.А. Строение верхней мантии Земли вдоль профиля Памир—р. Лена. — Сов. геология, 1966, № 2, 106—117.
- Лукк А. Некоторые особенности неупругого разреза верхней мантии под Памиро—Гиндукушской эпикентральной зоной. — В сб. "Труды X Генеральной ассамблеи ЕСК, т. I", М., 1970, с. 268—279. Ротапринт.
- Лукк А.А. Затухание сейсмических волн в очаговой зоне Памиро—Гиндукушских землетрясений. — В сб. "Экспериментальная сейсмология". М., "Наука", 1971.
- Лукк А.А., Нерсесов И.Л. Строение верхней части оболочки Земли по наблюдениям над землетрясениями с промежуточной глубиной очага. — Докл. АН СССР, 1965, 162, № 3, 559—562.
- Лукк А.А., Нерсесов И.Л., Чепкунас Л.С. Методика выделения слоя пониженной скорости в коре и мантии Земли. — Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1970, № 2, 15—20.
- Любимова Е.А. Исследование по термике Земли. Автореферат докт. дисс. М., 1966.
- Любимова Е.А. Использование термических данных для уменьшения неоднозначности обратных задач сейсмологии. — Докл. АН СССР, 1968, 179, № 1.
- Льюис Б., Майер Р. Сейсмические исследования верхней мантии восточнее оз. Верхнего. — В сб. "Материалы Второго всесоюзного совещания экспертов по взрывной сейсмологии". Киев, "Наукова думка", 1969.
- Магницкий В.А. Основы физики Земли. М., Геоледиздат, 1953.
- Магницкий В.А. О физическом составе вещества в глубоких областях земного шара. — Труды Геофиз. ин-та АН СССР, 1955, № 26 (153).
- Магницкий В.А. Внутреннее строение Земли. — Природа, 1956, № 7, 3—15.
- Магницкий В.А. О природе переходного слоя в оболочке Земли на глубине 400—900 км. — Изв. АН СССР, 1956<sub>1</sub>, № 6, 700—709.
- Магницкий В.А. О волноводах в земной коре и подкоровом слое. — Бюлл. МОИП, серия геол., 1958, 23, № 4.
- Магницкий В.А. Оболочка и кора Земли. — Сов. геология, 1961, № 5, 3—15.
- Магницкий В.А. Верхняя мантия и ее влияние на развитие земной коры. — Вестн. АН СССР, 1961<sub>1</sub>, № 11, 18—24.
- Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли. М., "Недра", 1965.
- Магницкий В.А. Основные достижения и пути развития физики Земли. — Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1967, № 11, 13—18.
- Магницкий В.А. Слой низких скоростей верхней мантии. М., "Наука", 1968.
- Магницкий В.А., Жарков В.Н. Природа слоев пониженных скоростей сейсмических волн в верхней мантии Земли. — В сб. "Проблемы строения земной коры и верхней мантии. Верхняя мантия, № 7". М., "Наука", 1970, с. 197—212.
- Магницкий В.А., Калинин В.А. Свойства оболочки Земли и физическая природа переходного слоя. — Изв. АН СССР, серия геофиз., 1950, № 1, 87—95.
- Магницкий В.А., Непрочнов Ю.П., Рыкунов Л.Н. О градиентах скоростей упругих волн и температуры под границей Мохоровичича. (Черное море, Индийский океан). — Докл. АН СССР, 1970, 195, № 1, 85—88.
- Магницкий В.А., Хорошева В.В. К вопросу о волноводе в оболочке Земли и его физической природе. — Докл. АН СССР, 1960, 135, № 2, 305—307.
- Макелвейн Дж. Б. Внутреннее строение Земли по сейсмическим данным. — В сб. "Внутреннее строение Земли". М., ИЛ, 1949.
- Маркушевич В.М. Устойчивость и некоторые оценки решения обратной задачи геометрической сейсмологии. — Канд. дисс. М., ИФЗ, 1967.
- Маркушевич В.М. Характеристические свойства годографа от глубинного источника. "Вычислительная сейсмология, вып. 4". М., "Наука", 1968.
- Мартьянов Н.Е. Области растяжения в оболочке Земли. — Докл. АН СССР, 1957, 116, № 6, 949—951.
- Матвеева Н.Н. Амплитудные кривые объемных волн  $P$  и  $S$  и природа границ раздела в верхней мантии. — В сб. "Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн, вып. VIII". М.—Л., "Наука", 1966.
- Матвеева Н.Н. Машинный алгоритм и методика определения скоростного разреза по совокупности кинематико—динамических данных. — В сб. "Вопросы динамической теории распространения сейсм. волн, вып. IX". М., "Наука", 1968.
- Матвеева Н.Н. Программа решения прямой и обратной задачи сейсмологии. — В сб. "Программы для интерпретации сейсмических наблюдений". Л., "Наука", 1972.
- Матвеева Н.Н., Алексеев А.С. Машинный поиск вариантов скоростного разреза верхней мантии по совокупности годографов глубоководных землетрясений. — В сб. "Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн, вып. VII". Изд-во МГУ, 1964.

- Матвеева Н.Н., Лукк А.А. Оценка точности построения годографов Памиро-Гиндукушской зоны и машинный поиск скоростного разреза верхней мантии. — Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1968, № 8, 12–24.
- Матвеева Н.Н., Рябой В.З. Изучение в различных регионах скоростного строения верхней мантии по данным ГСЗ. — В сб. "Кора и верхняя мантия Земли (геология, геофизика, геохимия)". М., Изд-во МГУ, 1974.
- Матвеева Н.Н., Рябой В.З., Разинкова М.И. Об изучении верхней мантии Земли методом ГСЗ. "Материалы Второго всесоюзного совещания по изучению коры и верхней мантии методами взрывной сейсмологии". М., "Наука", 1971.
- Матвеева Н.Н., Славина Л.Б. Некоторые результаты исследований особенностей океанической и континентальной мантии. — Тезисы докладов на совещании "Физические свойства, состав и строение верхней мантии". М., 1971.
- Матвеева Н.Н., Славина Л.Б. Некоторые результаты изучения особенностей океанической и континентальной мантии Земли. — В сб. "Строение земной коры и верхней мантии морей и океанов". М., "Наука", 1973, с. 56–64.
- Материалы Международного совещания экспертов по взрывной сейсмологии (Л., 1968). Киев. "Наукова думка", 1969.
- Маторина Т.В., Оборина С.Ф., Саваренский Е.Ф. Определение скоростей распространения продольных волн в оболочке Земли на основе наблюдений над глубоким землетрясением. — Труды Геофиз. ин-та АН СССР, 1955, № 30 (157), 22–29.
- "Машинная интерпретация сейсмических волн. Вычислительная сейсмология, вып. 2". М., 1966.
- Меламуд А.Я., Худзинский Л.Л., Дейнега С.А. Станция промежуточной магнитной записи сейсмических колебаний. — Изв. АН СССР, серия геофиз., 1959, № 2, 197–207.
- Михайлова Г.Н., Парийский Б.С. Об интенсивности волн, отраженных от границ второго рода в мантии Земли. — Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1965, № 5, 63–66.
- Михота Г.Г. Спектры и интенсивность глубинных волн. — В сб. "Материалы Международного совещания экспертов по взрывной сейсмологии". Киев. "Наукова думка", 1969.
- Моррис Д.В. Анизотропия скоростей в верхней мантии Тихого океана. — В кн. "Материалы Международного совещания экспертов по взрывной сейсмологии". Киев, "Наукова думка", 1969.
- "Наука о Земле на новом этапе". — Бюлл. МОИП, отдел геол., 1971, 46, № 3, 59.
- Нейгауз М.Г., Шкадинская Г.В. Метод расчета поверхностных волн Релея в вертикально неоднородном полупространстве. — В сб. "Вычислительная сейсмология, вып. 2". М., "Наука", 1966.
- "Некоторые прямые и обратные задачи сейсмологии. Вычислительная сейсмология, вып. 4". М., 1968.
- Непрочнов Ю.П. Сейсмические исследования земной коры и верхней мантии различных структур океана. — Докт. дисс. М., ИФЗ, 1970.
- Непрочнов Ю.П., Ковылин В.М., Ельников И.Н., Рыкунов Л.Н., Зверев С.М. Глубинное сейсмическое зондирование в Индийском океане в совместной экспедиции н.-и.с. "Академик Курчатов" и "Витязь". — Докл. АН СССР, 1969, 185, № 4.
- Непрочнов Ю.П., Непрочнова А.Ф., Рыкунов Л.Н., Холонов Б.В. Об оценке градиента скорости в верхней мантии по данным ГСЗ. — Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1971, № 8.
- Непрочнов Ю.П., Рыкунов Л.Н. Экспериментальные данные о слое повышенной скорости в верхней мантии Земли. — Докл. АН СССР, 1970, 194, № 1, 80–82.
- Непрочнов Ю.П., Рыкунов Л.Н., Ельников И.Н., Ковылин В.М., Береснев А.Ф., Непрочнова А.Ф., Семенов Г.А., Седов В.В., Лунарский Г.Н., Холонов Б.В. Строение коры и верхней мантии Аравийско-Индийского хребта и прилегающих областей дна океана по данным ГСЗ. — В сб. "Исследования по проблеме рифтовых зон мирового океана, т. 2". М., "Наука", 1972, с. 44–119.
- Нерсесов И.Л., Лукк А.А. Скоростной разрез верхней части оболочки и некоторые особенности ее строения по направлению Памир-Байкал. — Тезисы докл. конф. МГТ. М., 1963.
- Нерсесов И.Л., Николаев А.В., Седова Е.Н. Характер неоднородности мантии Земли по сейсмическим данным. — Докл. АН СССР, 1972, 207, № 4, 846–849.
- Нерсесов И.Л., Раутиан Т.Г. Кинематика и динамика сейсмических волн на расстояниях до 3500 км от эпицентра. — Труды ИФЗ АН СССР, 1964, № 32 (199).
- Никифоров П.М. О внутреннем строении Земли. Природа, 1924, № 1–6, 10–30.
- Никифоров П.М. Сейсмология. — В кн. "Тихий океан". Русские научные исследования. Л., 1926, с. 77–83.

- Никифоров П.М. Основные проблемы советской сейсмологии. — Соц. реконструкция и наука, 1932, вып. 1, 81–92.
- Николаев А.В. Сейсмическая мутность реальных сред и возможность ее исследования. — Докл. АН СССР, 1967, 177, № 5.
- Николаев А.В. Применение модели мутной среды и предельные возможности метода ГСЗ. — В сб. "Тезисы докладов Второго всесоюзного совещания по изучению земной коры и верхней мантии Земли методами сейсмологии взрывов". М., 1969. Ротапринт.
- Николаев А.В. Опыт сейсмического группирования с целью исследования отражающих границ в коре и верхах мантии. — В сб. "Экспериментальная сейсмология". М., "Наука", 1971, с. 259–269.
- Николаев А.В. Сейсмика неоднородных и мутных сред. М., "Наука", 1973.
- Николаев А.В., Аверьянов А.Г. Исследование амплитуд продольных волн в плоской модели среды со случайными флуктуациями коэффициента поглощения. — Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1970, № 10.
- Николаев А.В., Галкин И.Н., Павленкова Н.И., Седова Е.Н., Старшинова Е.А., Трегуб Ф.С. Исследование сейсмической мутности земной коры и верхней мантии. — В сб. "Строение земной коры и верхней мантии морей и океанов". М., "Наука", 1973.
- Николаев А.В., Галкин И.Н., Старшинова Е.А., Седова Е.Н., Павленкова Н.И. Результаты исследования сейсмической мутности коры и верха мантии. — Тезисы докладов к симпозиуму "Физические свойства, состав и строение верхней мантии". М., 1971.
- Николаев А.Д., Салтыкова Т.И. Мировой центр сбора геофизических данных. — Вестн. АН СССР, 1961, т. XXXI, № 8.
- Николаев А.В., Трегуб Ф.С. Результаты исследования статистической модели земной коры. — Докл. АН СССР, 1969, 189, № 6.
- Облогина Т.И., Пийп В.Б., Вашилов Ю.Я., Камбаров Н.Ш. Новый подход к интерпретации данных ГСЗ в районе Большого Каратау. — Докл. АН СССР, 1969, 188, № 5.
- "Одиннадцатая ассамблея МГТС в Торонто". М., Изд-во АН СССР, 1959.
- "Окраины континентов и островные дуги". М., "Мир", 1970.
- Определение строения Земли по дисперсии скоростей распространения поверхностных волн. Руководство. Под ред. Е.Ф.Саваренского. М., ВИНТИ, 1966.
- Осадчий А.П., Дараган С.К. Аппаратура КОД для многоканальной цифровой регистрации сейсмических сигналов. — В сб. "Вычислительная сейсмология, вып. 2". М., "Наука", 1966.
- Отчет Советского комитета МГТ о выполнении программы МГТ. М., 1958. Ротапринт.
- Павленкова Н.И., Пилипенко В.Н., Роман В.А. Методика составления скоростных разрезов земной коры. Киев, 1972.
- Пасечник И.П. К определению зависимости коэффициента поглощения продольных сейсмических волн, распространяющихся в мантии Земли. — Докл. АН СССР, 1966, 166, № 6.
- Петрашень Г.И. Распространение упругих волн в слоисто-изотропных средах, разделенных параллельными плоскостями. Ученые записки ЛГУ, серия матем., 1952, № 162.
- Петрашень Г.И. Материалы количественного изучения динамики сейсмических волн, т. II–III. Л., Изд-во ЛГУ, 1957, 1958.
- Петрашень Г.И. Элементарная теория распространения сейсмических волн. — В сб. "Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн, вып. III". Л., Изд-во ЛГУ, 1959.
- Петрашень Г.И. Предисловие к сб. "Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн, вып. VI". Л., Изд-во ЛГУ, 1962.
- Петрашень Г.И. О моделировании процессов распространения сейсмических волн. — В сб. "Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн, вып. VII". Л., Изд-во ЛГУ, 1964.
- Петрашень Г.И. О строгости в постановке задач на сейсмическое моделирование. — В сб. "Геоакустика". М., "Наука", 1966.
- Петрашень Г.И., Алексеев А.С., Гельчинский В.Я. Элементарная теория распространения сейсмических волн. — В кн. "Вопросы теории сейсмических волн, вып. III". Л., Изд-во ЛГУ, 1959.
- Петрашень Г.И., Гельчинский В.Я. Пути развития теории распространения сейсмических волн. — В сб. "Тезисы докладов Второго всесоюзного совещания по изучению земной коры и верхней мантии Земли методами сейсмологии взрывов". М., 1969. Ротапринт.
- Петрашень Г.И., Енальский В.А. О некоторых интерференционных явлениях в средах, содержащих плоскопараллельные слои. — Изв. АН СССР, серия геофиз., 1956, № 9–11; 1957, № 10.

- Пилипенко В.Н. Решение прямой кинематической задачи сейсморазведки на ЭВМ при сложном распределении скорости. — В кн. "Материалы IV научно-технической конференции молодых геофизиков Украины". Киев, 1971.
- Пилипенко В.Н. Применение численного варианта полей времен в интерпретации материалов сейсморазведки. — В сб. "Геофиз. исследования на Украине", Киев, 1973, с 20–28.
- Повзнер А.Д. История подготовки и осуществления системы научных наблюдений по программе МГГ. — Канд. дисс. М., ИИЕТ, 1966.
- Полужидкий слой мантии. — Природа, 1965, № 1, 116–117.
- Померанцева И.В. Изучение коры и верхней мантии при помощи сейсмических станций "Земля". — Бюлл. МОИП, отдел геол., 1966, 41, № 4, 149.
- Померанцева И.В. Геологическая интерпретация глубинных сейсмических разрезов земной коры и верхней мантии. — В сб. "Глубинное строение Урала". М., "Наука", 1968, с 163–173.
- Померанцева И.В., Можженко А.Н., Егоркина Г.В., Соколова И.А. Методика и основные результаты изучения глубинного строения земной коры и верхней мантии с помощью станций "Земля". — В сб. "Методика и результаты комплексных глубинных геофизических исследований". Л., 1969.
- Померанцева И.В., Можженко А.Н., Егоркина Г.В., Шумилина Л.С., Барскова Л.П. Основные результаты изучения строения земной коры и верхней мантии в Азово-Кубанской впадине при помощи сейсмических станций "Земля". — Докл. АН СССР, 1967, 173, № 6, 1397–1400.
- Померанцева И.В., Можженко А.Н., Соколова И.А., Егоркина Г.В. Применение сейсмических станций "Земля" при изучении строения юго-востока Русской платформы. — Докл. АН СССР, 1965, 163, № 1.
- Померанцева И.В., Можженко А.Н., Соколова И.А., Егоркина Г.В. Результаты региональных исследований кристаллической толщи земной коры и верхней мантии при помощи сейсмической станции "Земля". — В кн. "Методика, техника и результаты геофиз. разведки". М., "Недра", 1967.
- Потапьев С.В., Туезов И.К. Применение бомбометания с воздуха при региональных сейсмических исследованиях. — В сб. "Тезисы Второго всесоюзного совещания по изучению земной коры и верхней мантии методами сейсмологии взрывов". М., 1969, Ротапринт. "Проблемы строения земной коры и верхней мантии. Верхняя мантия, № 7". Отв. ред. В.А. Магничкий. М., "Наука", 1970.
- Программа научных исследований в Международном геофизическом году 1957–1958 г. Информ. бюлл. МГГ, № 2, М., Изд-во АН СССР, 1957.
- Протоколы заседаний Постоянной Центральной сейсмической комиссии, 1915, 7, вып. 1, стр. LIX.
- Пузырев Н.Н. К вопросу о применении упрощенных схем наблюдений при изучении складчатого фундамента Западно-Сибирской низменности методом преломленных волн. — Геология и геофизика, 1960, № 11.
- Пузырев Н.Н. О состоянии сейсмических методов изучения земной коры и верхней мантии. — Геология и геофизика, 1967, № 10.
- Пузырев Н.Н. Схемы наблюдений в ГСЗ, применяемые в СССР при исследованиях на континентах. — В сб. "Материалы Международного совещания экспертов по сейсмологии". Киев, 1969, с 8–14.
- Пузырев Н.Н., Косминская И.П. Методические проблемы ГСЗ. — В сб. "Тезисы докладов Второго всесоюзного совещания по изучению земной коры и верхней мантии Земли методами сейсмологии взрывов". М., 1969, Ротапринт.
- Пузырев Н.Н., Крылов С.В., Потапьев С.В. Точечные сейсмические зондирования. В сб. "Методика сейсморазведки". М., "Наука", 1965.
- Рагимов Ш.С. Вопросы изучения строения Земли. Баку, 1966.
- Развитие научных исследований по сейсмологии. — Природа, 1959, № 3, 113–114.
- Райт Р.У. Анизотропия верхней мантии. — В сб. "Земная кора и верхняя мантия". М., "Мир", 1972, с 208–214.
- Резанов И.А. "Верхняя мантия и ее влияние на развитие земной коры". — Сов. геология, 1963, № 6, 134–145.
- Резанов И.А. Исследования по проекту "Верхняя мантия и ее влияние на развитие земной коры". — Вестн. АН СССР, 1967, № 5, 69–72.
- Резанов И.А., Галдин Н.Е. О геологическом значении анизотропии сейсмических скоростей в земной коре. — Изв. АН СССР, серия геол., 1967, № 4, 10–16.
- Резвой Д.П. Некоторые вопросы соотношения кора-мантия. — В кн. "Геологический сборник", № 10. Львов, Изд-во Львовского ун-та, 1966, с 130–141.
- Рейснер Г.И. Комплексные исследования земной коры и верхней мантии. — Вестн. АН СССР, 1972, № 9, 115–116.

- Ризниченко Ю.В. Геометрическая сейсмика слоистых сред. — Труды Ин-та теор. геофиз. АН СССР, 1946, 2, вып. 1.
- Ризниченко Ю.В. Изучение строения земной коры СССР методом ГСЗ. — *Studia geophys. et geodes.*, 1958, 2, № 2, 133–140.
- Ризниченко Ю.В. Методы массового определения координат очагов близких землетрясений и скоростей сейсмических волн в области расположения очагов. — Изв. АН СССР, серия геофиз., 1958<sub>1</sub>, № 4.
- Ризниченко Ю.В. Опорные сечения Земли. — Вестн. АН СССР, 1961, № 8, 37–44.
- Ризниченко Ю.В., Косминская И.П. О природе слоистости земной коры и верхней мантии. — Докл. АН СССР, 1963, 153, № 2.
- Ризниченко Ю.В., Федынский В.В. Совещание рабочей группы по земной коре в Париже 19–22 марта 1962 г. — Изв. АН СССР, серия геофиз., 1962, № 7, 990–992.
- Ризниченко Ю.В., Шамина О.Г. Моделирование продольных волн в верхней мантии Земли. — Изв. АН СССР, серия геофиз., 1963, № 2.
- Ризниченко Ю.В., Шамина О.Г. Исследование зоны тени при моделировании коры и верхней мантии Земли. — Бюлл. Совета по сейсмологии, 1963<sub>1</sub>, № 15.
- Ризниченко Ю.В., Шамина О.Г. Сопоставление амплитудных кривых, полученных на волноводной модели мантии, с сейсмическими данными. — Изв. АН СССР, серия геофиз., 1964, № 8, 1129–1141.
- Ритсема А.Р. Сейсмология и исследование верхней мантии. — В сб. "Земная кора и верхняя мантия". М., "Мир", 1972.
- Рихтер Ч.Ф. Элементарная сейсмология. М., ИЛ, 1963.
- Рогожина В.А. Некоторые особенности строения верхней мантии в р-не Прибайкалье-Монголия по сейсмическим данным. — В сб. "Материалы конференции молодых ученых". Иркутск, Ин-т земной коры, 1968, с 177–180.
- Розова Е.А. Составление годографа и определение основных сейсмических элементов для Средней Азии. — Труды Сейсмол. ин-та, 1936, № 72.
- Розова Е.А. Землетрясения Средней Азии. — Труды Сейсмол. ин-та, 1947, № 128.
- Романов В.Г. Некоторые обратные задачи для дифференциальных уравнений гиперболического типа. Новосибирск, 1970.
- Рыкунов Л.Н., Хорошева В.В., Седов В.В. Двухмерная модель сейсмического волновода с нерезкими границами. Изв. АН СССР, серия геофиз., 1960, № 11.
- Рябой В.З. Изучение характеристик глубинных волн при сейсмических исследованиях коры и верхней мантии Земли методом ГСЗ. — Канд. дисс. М., ИФЗ, 1965.
- Рябой В.З. Строение земной коры и верхней части мантии по профилю ГСЗ Копет-Даг-Аральское море. — Сов. геология, 1966, № 5, 159–162.
- Рябой В.З. Кинематические и динамические характеристики волн, связанных с границами в земной коре и верхней мантии. — Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1966<sub>1</sub>, № 3.
- Рябой В.З. Сигналы, регистрируемые при ГСЗ и основные параметры аппаратуры. — В сб. "Материалы Международного совещания экспертов по взрывной сейсмологии". Киев, "Наукова думка", 1969.
- Рябой В.З. Сейсмология взрывов изучает глубины Земли. — Земля и вселенная, 1969<sub>1</sub>, № 3, 70–73.
- Рябой В.З. Аномалии времен пробега  $P_{np}^M(P_n)$  и скоростные неоднородности верхней мантии территории СССР. — Докл. АН СССР, 1973, 212, № 1.
- Рябой В.З., Галкин И.Н. О возможности использования абсолютных уровней сигналов во взрывной сейсмологии. — В сб. "Тезисы докладов Второго всесоюзного совещания по изучению земной коры и верхней мантии Земли методами сейсмологии взрывов". М., 1969, Ротапринт.
- Рябой В.З., Разинкова Н.И. Сейсмическая характеристика границ раздела в верхней части мантии Земли. — В сб. "Тезисы докладов Второго всесоюзного совещания по изучению земной коры и верхней мантии Земли методами сейсмологии взрывов". М., 1969, Ротапринт.
- Рябой В.З., Старобинец Л.Н. Сравнительный анализ материала сейсмических исследований верхней части мантии. Исследование искажения сейсмических колебаний регистрирующим каналом ГСЗ. — М., Фонды ИФЗ, 1973.
- Рябой В.З., Старобинец Л.Н. Сейсмические исследования верхней мантии за рубежом (обзор). М., ВИЭМС, 1973. Ротапринт.
- Саваренский Е.Ф. Об аналитическом годографе. — Труды Сейсмол. ин-та, 1940, № 102, 3–19.
- Саваренский Е.Ф. К вопросу о неоднородности в глубинном строении Земли. — Докл. АН СССР, 1940<sub>1</sub>, 27, № 1.
- Саваренский Е.Ф. Землетрясения с глубокими очагами. — Труды Сейсмол. ин-та, 1940<sub>2</sub>, № 96.

- Саваренский Е.Ф. О сейсмических волнах, отраженных от границы на глубине 900 км. Труды Сейсмол. ин-та АН СССР, 1941, № 106, 6-8.
- Саваренский Е.Ф. Направление выхода сейсмических лучей и исследование строения Земли. - Изв. АН СССР, серия географ. и геофиз., 1948, XII, № 4.
- Саваренский Е.Ф. По поводу дифференциального метода в сейсмологии и об углах выхода сейсмической радиации в Пулкове. - Труды Геофиз. ин-та АН СССР, 1948, I, № 1 (128).
- Саваренский Е.Ф. Об углах выхода сейсмической радиации и некоторых смежных вопросах. - Труды Геофиз. ин-та АН СССР, 1952, № 15 (142).
- Саваренский Е.Ф. Строение оболочки Земли по сейсмическим данным. - Труды Геофиз. ин-та АН СССР, 1955, № 26 (153), 100-116.
- Саваренский Е.Ф. Сейсмология и сейсмическая служба в СССР. - Изв. АН СССР, 1957, № 11, 1332-1340.
- Саваренский Е.Ф. О работах по сейсмологии в КНР. - Изв. АН СССР, серия геофиз., 1958, № 6, 765-769.
- Саваренский Е.Ф. Изучение внутреннего строения Земли по сейсмическим данным. - Вестн. АН СССР, 1962, № 9, 134-135.
- Саваренский Е.Ф., Б.Б. Голицин - основоположник отечественной сейсмологии. - В сб. "Изучение внутреннего строения Земли по сейсмическим данным". Бюлл. Совета по сейсмологии, 1963, № 15.
- Саваренский Е.Ф., Б.Б. Голицин и некоторые задачи современной сейсмологии. - Изв. АН СССР, серия геофиз., 1963, I, № 1, 3-19.
- Саваренский Е.Ф. Изучение внешней оболочки Земли по объемным сейсмическим волнам. - Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1966, № 3.
- Саваренский Е.Ф. Итоги и задачи советской сейсмологии. - Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1967, № 1, 28-40.
- Саваренский Е.Ф. Сейсмические волны. М., "Недра", 1972.
- Саваренский Е.Ф., Айвазов И.В. Азимуты и углы выхода сейсмической радиации при землетрясениях 24 и 25 апреля 1957 г. - Труды Ин-та геофизики АН СССР, 1958, XVII.
- Саваренский Е.Ф., Зайцев Л.П. Внутреннее строение Земли. - В сб. "Итоги науки геофизики". М., ВИНТИ, 1965.
- Саваренский Е.Ф., Кирнос Д.П. Элементы сейсмологии и сейсмометрии. М.-Л., ГИТТЛ, 1949.
- Саваренский Е.Ф., Кирнос Д.П. Элементы сейсмологии и сейсмометрии. Теортехиздат, 1955.
- Саваренский Е.Ф., Косарев Г.Л. Цифровая фильтрация длиннопериодных колебаний Аляскинского землетрясения 1964 г. - Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1967, № 12.
- Саваренский Е.Ф., Монахов Ф.Н. Применение азимутов и углов сейсмической радиации и интерпретации наблюдений. - Труды Геофиз. ин-та АН СССР, 1948, № 1 (128).
- Саваренский Е.Ф., Попов И.И., Лазарева А.П. Наблюдения длиннопериодных волн Чилийского землетрясения 1960 г. - Изв. АН СССР, серия геофиз., 1961, № 8.
- Саваренский Е.Ф., Старовойт О.Е. Упругие колебания земного шара. - Природа, 1963, № 3, 9-14.
- Саваренский Е.Ф., Старовойт О.Е. Об использовании длиннопериодных поверхностных сейсмических волн для изучения внутреннего строения Земли. - Сб. "Геофизические исследования строения земной коры". Киев, "Наукова думка", 1966; Геофиз. сб. АН УССР, 1966, вып. 18, 90-93.
- Саваренский Е.Ф., Старовойт О.Е., Федоров С.А. Длиннопериодные волны Релея Аляскинского землетрясения 28 марта 1964 г. - Изв. АН СССР, серия геофиз., 1964, № 12.
- Сагалова Е.А. Глубокие землетрясения Карпат. - В сб. "Сейсмогенные структуры и сейсмодислокации". М., ВНИИ Геофизика, 1973. Ротапринт.
- Сайкс Л., Лэндисмен М., Сато И. Скорости поперечных волн в мантии, определенные по дисперсии волн Лява и Релея в океанических областях. - В сб. "Верхняя мантия Земли". М., "Мир", 1964.
- Седова Е.И. Изучение неоднородностей в земной коре и верхней части мантии по динамическим характеристикам удаленных землетрясений. - В сб. "Экспериментальная сейсмология". М., "Наука", 1971.
- "Сейсмологические исследования верхней мантии Земли". М., "Наука", 1968. (Сводный отчет 1966 г. Изд. МГК) на англ. яз.
- "Сейсмология (к итогам МГТ)". Информ. бюлл. МГТ, 1961, № 9, 24-25.
- Сихарулидзе Д.И. Дисперсия волн Лява при однослойной и двухслойной моделях земной коры. - Труды Ин-та геофиз. АН СССР, 1960, 18, 129-143.

- Сихарулидзе Д.И. Обертонь волн Релея и изучение строения оболочки Земли. — Сообщ. АН ГССР, 1969, 55, № 1.
- Сихарулидзе Д.И., Ахалбедатвили А.М. Длиннопериодные Релеевские волны в оболочке Земли. — Сооб. АН ГССР, 1965, 38, № 2.
- Сихарулидзе Д.И., Лебедева Т.М., Еремян В.И. О каналовых волнах  $P_a$  и  $S_a$  в верхней мантии Земли. — Сообщ. АН ГССР, 1965, 39, № 1, 55–58.
- Славина Л.Б. Особенности времен пробега  $P$ -волн для станций СССР от землетрясений Тихоокеанского сейсмического пояса. — Канд. дисс. М., ИФЗ, 1970.
- "Собственные колебания Земли". М., "Мир", 1964.
- Соловьев С.Л. Развитие сейсмической службы СССР. — Вестн. АН СССР, 1959, № 6, 121–122.
- Соловьев С.Л. Сессия Совета по сейсмологии 4–12 апреля 1960 г. — Изв. АН СССР, серия геофиз., 1960, № 10, 1510–1511.
- Соловьев С.Л. Заседание ЕСК. — Изв. АН СССР, серия геофиз., 1961, № 1, 120.
- Соловьев С.Л., Ивашенко А.И., Соловьева О.Н. Строение коры и верхней мантии Земли на Дальнем Востоке по сейсмологическим данным. — В сб. "Проблемы строения земной коры и верхней мантии. Верхняя мантия, № 7". М., "Наука", 1970, с. 40–49.
- Соловьев С.Л., Соловьева О.Н. Сопоставления амплитудных полей объемных волн от Курило–Камчатских и Средиземноморских землетрясений. — Изв. АН СССР, серия геофиз., 1964, № 4.
- Соловьев С.Л., Соловьева О.Н. Скорость колебания земной поверхности в объемных волнах неглубокофокусных Курило–Камчатских землетрясений на расстояниях до  $170^\circ$ . — Изв. АН СССР, "Физика Земли", 1967, № 1.
- "Сообщение о научных работах по сейсмологии и физике недр Земли, представленное в Международную ассоциацию сейсмологии и физики недр Земли к XI Генеральной ассамблее МГТС". М., 1957, с. 51–59.
- "Сообщение о научных работах по сейсмологии и физике недр Земли 1957–1959 гг., представленное в Международную ассоциацию сейсмологии и физики недр Земли к XII Генеральной ассамблее МГТС". М., 1960.
- "Сообщение о научных работах по сейсмологии и физике недр Земли за 1960–1962 гг., представленное в Международную ассоциацию сейсмологии и физики недр Земли к XIII Генеральной ассамблее МГТС". М., 1963.
- "Сообщение о научных работах по сейсмологии и физике недр Земли за 1963–1966 гг., представленное в Международную ассоциацию сейсмологии и физики недр Земли к XIV Генеральной ассамблее МГТС". М., 1967.
- Станция КОД — В сб. "Обмен передовым научно-техническим и производственным опытом, № 5–64–677/20." М., 1964.
- Старовойт О.Е. Фазовые и групповые скорости длиннопериодных волн Релея. — Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1965, № 11, 67–79.
- Старовойт О.Е., Саваренский Е.Ф., Федоров С.А. Строение оболочки Земли по наблюдениям длиннопериодных поверхностных волн. — В сб. "Проблемы строения земной коры и верхней мантии. Верхняя мантия, № 7". М., "Наука", 1970, с. 90–97.
- "Строение Земли по поверхностным сейсмическим волнам". Пер. с англ. М., "Мир", 1965.
- "Строение земной коры в области перехода от Азиатского континента к Тихому океану". М., "Наука", 1965.
- "Строение земной коры и верхней мантии морей и океанов". М., "Наука", 1973.
- "Строение коры и верхней части мантии по геофизическим данным. Библиографический указатель (1937–1961 гг.). Сост. — Павлова А.И. М., Изд-во АН СССР, 1962.
- Субботин С.И. Глубинная структура территории Украинской ССР по данным геофизических исследований. — Сб. "Геологические результаты прикладной геохимии и геофизики", раздел 2. Докл. сов. геол. XXI Сессии Международного геол. конгресса. Проблема 2. М., Госгеолтехиздат, 1960, с. 58–66.
- Субботин С.И. Проблемы верхней мантии Земли. — Геофиз. сб., вып. 19. Киев, "Наукова думка", 1967.
- Субботин С.И. Проблемы глубинного строения коры и мантии территории Украины и акватории прилегающих морей. — Геологический ж., 1966, № 5, 60–63.
- Субботин С.И., Наумчик Г.Л., Рахимова И.Ш. Процессы в верхней мантии Земли и связь с ними строения земной коры. Киев, "Наукова думка", 1964.
- Субботин С.И., Наумчик Г.Л., Рахимова И.Ш. Мантия Земли и тектогенез. Киев, "Наукова думка", 1968.
- Тараканов Р.З. Некоторые результаты изучения землетрясений Дальнего Востока. — Труды СахКНИИ, 1961, вып. 10, 100–111.

- Тараканов Р.З. Скоростной разрез верхней части оболочки Земли для Курило-Камчатской и Японской островных дуг. — Тезисы докл. конф. МГТ, М., 1963.
- Тараканов Р.З. Географы волн  $P$  и  $SP$  и скоростной разрез верхней мантии по данным наблюдений над Курило-Камчатскими землетрясениями. — Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1965, № 7.
- Тараканов Р.З. Скоростные разрезы и строение верхней мантии Курило-Японского региона. — Канд. дисс. Новоалександровск, 1969.
- Тараканов Р.З. Мозаика скоростей в верхней мантии Курило-Японского региона. — Труды СахКНИИ, серия "Геофизика", 1969, вып. 20.
- Тараканов Р.З. Строение фокальной зоны Курило-Камчатской островной дуги. — В сб. "Земная кора островных дуг и дальневосточных морей. Верхняя мантия, № 9". М., "Наука", 1972.
- Тараканов Р.З., Ким Чун-Ун, Сухомлинова Р.И. Зависимость отношения скоростей продольных и поперечных волн от глубины. — Труды СахКНИИ, 1969, вып. 20, 165-181.
- Тараканов Р.З., Ким Чун-Ун, Сухомлинова Р.И. Скоростной разрез верхней мантии Курило-Японского региона для поперечных волн. — Труды СахКНИИ, 1970, вып. 24, 107-120.
- Тараканов Р.З., Левый Н.В. Многоастеносферная модель верхней мантии Земли по сейсмологическим данным. — Тезисы доклада на выездной сессии Совета по сейсмологии в Южно-Сахалинске. М., 1965, Ротапринт.
- Тараканов Р.З., Левый Н.В. Полиастеносферная модель верхней мантии Земли по сейсмическим данным. — Докл. АН СССР, 1967, 176, № 3.
- Тараканов Р.З., Левый Н.В. Новая модель слоистого строения верхней мантии Земли Курило-Японского региона. — В сб. "Строение и развитие земной коры на Советском Дальнем Востоке", "Наука", 1969.
- Тараканов Р.З., Левый Н.В. Каналовые волны. — Труды СахКНИИ, 1970, вып. 24, сборник 2.
- Тарков А.П. Глубинное строение основных планетарных структур по геофизическим данным. Воронеж, Изд-во Воронежского ун-та, 1970.
- Тарков А.П., Чамо С.С. Глубинное строение литосферы в районе Воронежского кристаллического массива. — В сб. "Геология и геофизика моря. Геофизические исследования земной коры". М., "Наука", 1972, с. 116-127.
- Трегуб Ф.С. Методика и результаты исследования первых волн в ГСЗ. — Канд. дисс. М., ИФЗ, 1969.
- Тресков А.А. Определение основных поверхностей разрывности в структуре земного шара методом фиктивных волн. — Изв. АН СССР, серия геогр. и геофиз., 1948, т. XII, № 5.
- Туезов И.К., Жильцов З.Г. Глубинное строение Японии по сейсмическим данным. — В сб. "Методика и результаты исследований земной коры и верхней мантии. Верхняя мантия, № 8". М., "Наука", 1972.
- Туезов И.К., Попов А.А., Суворов А.А., Трескова Ю.А. Глубинное строение Приморья и прилегающих морей по данным ГСЗ. — В сб. "Материалы Второго всесоюзного совещания по изучению земной коры и верхней мантии методами сейсмологии взрывов", М., 1969, Ротапринт.
- Туезов И.К., Тараканов Р.З. О горизонтальных и вертикальных неоднородностях земной коры и верхней мантии северо-западной части Тихоокеанского кольца. — В сб. "2-й Международный океаногр. конгресс, 1966". Тезисы докл. М., "Наука", 1966, с. 373-379.
- Туезов И.К., Тараканов Р.З., Сирик И.М., Павлов В.А. Неоднородности земной коры и верхней мантии южной части советского сектора Тихоокеанского кольца в свете геолого-геофиз. данных. — Геология и геофизика, 1968, № 7, 72-81.
- Тулина Ю.В. Сопоставление магнитных аномалий с сейсмическими свойствами границы Мохоровичича. — Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1965, № 3.
- Удинцев Г.Б., Косминская И.П. Изучение земной коры и верхней мантии (по докладам XI Тихоокеанского научного конгресса в Токио, 1965). — Геофиз. бюлл., 1969, № 20, 33-49.
- Ушаков С.А., Исаев Б.Н. Поверхность "свободной" мантии под океаном. — Изв. вузов, серия "Геология и разведка", 1969, № 11, 12-14.
- Фарберов А.И. Магматические очаги вулканов Восточной Камчатки по сейсмологическим данным. — Канд. дисс. М., ИФЗ, 1970.
- Федотов С.А. О поглощении поперечных сейсмических волн в верхней мантии. — Изв. АН СССР, серия геофиз., 1963, № 6.
- Федотов С.А. Строение верхней мантии юга Курильской островной дуги по данным детальных сейсмологических исследований. — Тезисы докл. конф. МГТ, М., 1963.

- Федотов С.А. Глубинное строение, свойства верхней мантии и вулканическая деятельность Курило-Камчатской островной дуги по сейсмологическим данным на 1964 г. — В сб. "Вулканизм и глубинное строение Земли". М., "Наука", 1966.
- Федотов С.А. О сейсмичности, свойствах мантии и сейсмическом прогнозе в области Курило-Камчатской дуги. — Докт. дисс. М., ИФЗ, 1969.
- Федотов С.А. Глубинное строение, свойства верхней мантии и вулканическая деятельность Курило-Камчатской островной дуги по сейсмическим данным на 1969 г. — В кн. "Вулканизм гидротермы и глубины Земли". Петропавловск-Камчатский, 1969<sup>1</sup>.
- Федотов С.А., Аверьянова В.Н., Багдасарова А.М., Кузин И.П., Тараканов Р.З. Некоторые результаты детального изучения сейсмичности южных Курильских островов. Изв. АН СССР, серия геофиз. 1961, № 5.
- Федотов С.А., Багдасарова А.М., Кузин И.П., Тараканов Р.З. О сейсмичности и глубинном строении юга Курильской островной дуги. — Докл. АН СССР, 1963, 153, № 3.
- Федотов С.А., Багдасарова А.М., Кузин И.П., Тараканов Р.З. Землетрясения и глубинное строение юга Курильской островной дуги. М., "Наука", 1969.
- Федотов С.А., Болдырев С.Л. О зависимости поглощения объемных волн от частоты в коре и верхней мантии Курильской островной дуги. — Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1969, № 9, 17-33.
- Федотов С.А., Кузин И.П. Скоростной разрез верхней мантии в области Южных Курильских островов. — Изв. АН СССР, серия геофиз., 1963, № 5, 670-686.
- Федотов С.А., Матвеева Н.Н., Тараканов Р.З., Яновская Т.Б. О скоростях продольных волн в верхней мантии в областях Японских и Курильских островов. — Изв. АН СССР, серия геофиз., 1964, № 8.
- Федотов С.А., Славина Л.Б. Оценка скорости продольных волн в верхней мантии под северо-западной частью Тихого океана и Камчаткой. — Изв. АН СССР, 1968, № 2, 8-31.
- Федотов С.А., Славина Л.Б., Шумилина Л.С. Скорости продольных волн в верхней мантии под Камчаткой. — В кн. "Тектоника дна океанов и островных дуг". Южно-Сахалинск, 1972.
- Федотов С.А., Фарберов А.И. О поглощении поперечных сейсмических волн в земной коре и верхней мантии в районе Авачинской группы. — Сб. "Проблемы вулканизма". Петропавловск-Камчатский, 1964.
- Федотов С.А., Фарберов А.И. Об экранировании поперечных сейсмических волн в магматическом очаге верхней мантии в районе Авачинских вулканов. — В кн. "Вулканизм и глубинное строение Земли". "Наука", 1968.
- Федынский В.В. Важнейшие итоги и предстоящие задачи региональных геофизических исследований. — В сб. "Тезисы докладов на Втором всесоюзном совещании по изучению земной коры и верхней мантии Земли методами сейсмологии взрывов." М., 1969, Ротапринт.
- "Физика земной коры и верхней мантии". М., "Мир", 1966.
- Халевин Н.И. О строении земной коры Русской платформы, Урала и Западно-Сибирской низменности. — В сб. "Строение земной коры Урала", Свердловск, 1967.
- Халевин Н.И., Дружинин В.С., Рыбалка В.Е., Незолонова Э.А. земная кора и верхи мантии Урала. — В сб. "Труды X Генеральной ассамблеи ЕСК, т. 1", М., 1970, с. 300-311, Ротапринт.
- Халевин Н.И., Незолонова Э.А., Браславский Б.Я. Первые результаты сейсмологических исследований Института геофизики на Урале. — В сб. "Глубинное строение Урала". М., "Наука", 1968, с. 174-182.
- Халтурин В.И. Амплитуды и периоды сейсмических волн землетрясений. — Канд. дисс. Талгар-Москва, 1966.
- Хамрабаев И.Х., Бутовская Е.М., Кензин И.А. Итоги исследования земной коры и верхней мантии Узбекистана и задачи их комплексного изучения. — Узб. геол. ж., 1967, № 4, 3-7. (См. также Тезисы докл. Юбилейной науч. сессии АН Узб. ССР. Ташкент, ФАН, 1967, с. 359-360).
- Хейлз А.Л. К вопросу о промежуточных слоях в земной коре. — В сб. "Материалы Международного совещания экспертов по взрывной сейсмологии". Киев, "Наукова думка", 1969.
- Херрин Ю. Региональные изменения скорости волн  $P$  в верхней мантии под Северной Америкой. — В сб. "Земная кора и верхняя мантия". М., "Мир", 1972.
- Хили Дж. Результаты сейсмических исследований земной коры и мантии в США и задачи дальнейших исследований. — В сб. "Материалы Международного совещания экспертов по взрывной сейсмологии". Киев, "Наукова думка", 1969.
- Хили Дж., Уоррен Д. Сейсмическое зондирование в Северной Америке. — В сб. "Земная кора и верхняя мантия". М., "Мир", 1972.

- Хорошева В.В. Некоторые результаты исследования волн  $P_a$  и  $S_a$  по сейсмограммам СССР. — Изв. АН СССР, серия геофиз., 1960, № 11.
- Хорошева В.В. Исследование волновода на твердой двумерной модели с резкими границами. — Изв. АН СССР, серия геофиз., 1962, № 8.
- Хорошева В.В. Некоторые результаты исследования волновода на модели. — Бюлл. Совета по сейсмологии, 1963, № 15.
- Хоффман Дж.П., Берг Дж.У., Кук К.Л. Границы в верхней мантии, обнаруженные по сейсмическим отражениям. — В сб. "Верхняя мантия Земли". М., "Мир", 1964.
- Цекон Ц.Н. Внутреннее строение Земли. — Природа и знание, 1967, 20, № 1, 16–19 (Болгар. язык).
- Чамо С.С., Ефимкин Н.С., Борисова Т.Г., Айзенберг Г.М., Зиньковский В.Е., Белокопытов В.Н. Глубинное строение коры и верхней мантии Воронежской синеклизы. — Бюлл. МОИП, отдел геол., 1971, 46, № 5, 27–33.
- Чернова Т.В. Научные итоги МГТ. — Вестн. АН СССР, 1963, № 4, 108–111.
- Шамина О.Г. Методика трехмерного моделирования волновой модели мантии на твердых средах. — Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1965, № 7, 102–105.
- Шамина О.Г. Экспериментальные исследования необходимых и достаточных признаков волновода. — Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1966, № 12, 3–10.
- Шамина О.Г. Модельные исследования погружающегося волновода в верхней мантии. — В сб. "Труды X Генеральной ассамблеи ЕСК, т. 1". М., "Наука", 1970, с.141–150.
- Шамина О.Г. Ультразвуковое моделирование возможных схем строения верхней мантии. — В сб. "Экспериментальная сейсмология". М., "Наука", 1971, с. 254–258.
- Шамина О.Г., Ханутина Р.В. Модельные исследования мантии Земли без волновода. — Изв. АН СССР, серия "Физика Земли", 1967, № 12, 12–21.
- Шебалин Н.В. Использование соотношения между интенсивностью и балльностью землетрясений для оценки глубины астеносферы в районе Вранча (Карпаты). — Studia geophys et geod., 1958, 2, № 1, 69–91.
- Шебалин Н.В. Балльность, магнитуда и глубина очага землетрясения. — В кн. "Землетрясения в СССР", М., "Наука", 1961.
- Шебалин Н.В. Международный симпозиум по результатам МГТ. (Лос-Анджелес, 12–16 августа 1963). — Вестн. АН СССР, 1964, № 1, 81–82.
- Шебалин Н.В. Большая программа изучения Земли (XIII Ген. ассамблея МГТС в США). Вестн. АН СССР, 1964, № 1.
- Широкова Е.И. Некоторые данные о характере изменения скоростей в верхних слоях оболочки Земли. — Изв. АН СССР, серия геофиз., 1959, № 8.
- Шнирман Г.Л. Эпицентральная сейсмическая станция. — Труды Ин-та физики Земли АН СССР, 1964, № 35 (202).
- Щор Дж.Г., Райт Р.К. Кора и верхняя мантия Тихого и Индийского океанов по данным ГСЗ. — В кн. "Земная кора и верхняя мантия". М., "Мир", 1972.
- Штайн А. Некоторые замечания по методике ГСЗ. В сб. "Материалы Международного совещания экспертов по взрывной сейсмологии". Киев, "Наукова думка", 1969.
- Щербачева Б.Е., Бережнова О.Ф., Волхонин В.С., Гришанова Л.П., Линькова Т.М., Лобачевский И.В., Мелехин В.И., Штутин И.М., Крупская Г.В. Результаты изучения строения земной коры и верхней мантии на северо-востоке Иркутского амфи-театра с помощью станции "Земля". — В сб. "Прикладная геофизика, вып. 57". М., 1969, с. 90–98.
- Юинг Дж. Сейсмическая модель строения коры Атлантического океана. — В сб. "Земная кора и верхняя мантия". М., "Мир", 1972.
- Юинг М., Пресс Ф. Геофизические различия между континентами и океаническими бассейнами. — В сб. "Земная кора". М., ИЛ, 1957.
- Яновская Т.Б. Исследования полей смещений в поверхностных волнах с целью определения динамических параметров очагов землетрясений. Канд. дисс. М., ИФЗ, 1958.
- Яновская Т.Б. Вычисление скоростных разрезов верхней мантии по годографу сейсмических волн как обратная математическая задача. — Изв. АН СССР, серия геофиз., 1963, № 8, с 1171–1177.
- Яновская Т.Б. Программа для расчета годографов и амплитудных кривых объемных волн в слоистой среде. — Сб. "Вопросы количественного изучения динамики сейсмических волн, вып. 8". Л., Изд-во ЛГУ, 1966.
- Яновская Т.Б., Голикова Г.В. Метод и программа расчета волн  $P$  в оболочке Земли. — В сб. "Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн, вып. VII". Л., Изд-во ЛГУ, 1964.
- Яновская Т.Б., Голикова Г.В., Сурков Ю.А. Об амплитудных кривых волн  $P$ . Сб. "Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн, вып. VII". Л., Изд-во ЛГУ, 1964.

- Abe K., Kanamori H. Mantle structure beneath the Japan sea as revealed by surface waves. — Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo, Univ., 1970, 4, N 6A.
- Afanasyev G.D. New data on relationship between earth's crust and upper mantle. — Internat. Geol. Rev., 1967, 9, N 12, 1513–1536.
- Aki K. Some problems in statistical seismology.—J. Seismol. Soc. Japan, Ser. II, 1956, 8, N 4, 205–228.
- Aki K. Crustal structure in Japan from the phase velocity of Reyleigh waves. Pt 1. Use of network of seismological stations operated by the Japan Meteorological Agency. — Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ., 1961, 39, N 2.
- Aki K. Nature of Upper Mantle in Japan. — J. Geogr., 1964, 73, N 4, 27–28.
- Aki K. A computer program for precise determination of local earthquakes by revising focal depth and crust–mantle structure. — Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ., 1965, 43, 15–22.
- Aki K. Accuracy of origin time, epicentre and focal depth of local earthquake determined routinely by the Japan Meteorological Agency. — Bull. Earth. Res. Inst. Tokyo Univ., 1965, 43, N 1, 23–28.
- Aki K. Seismological evidences for the existence of soft thin layers in the upper mantle under Japan. — J. Geophys. Res., 1968, 73, N 2, 585–594.
- Aki K., Kaminuma K. Phase velocity of Love waves in Japan (pt 1). Love waves from the Aleutian shock of March 9, 1957. — Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ., 1963, 41, N 1, 243–259.
- Aki K., Press F. Upper mantle structure under ocean and continents from Rayleigh waves. — Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 1961, 5, N 4, 292.
- Alekseev A.S., Belonosova A.V., Burmakov I.A., Krasnopevtseva G.V., Matveeva N.N., Nersessov G.L., Pavlenkova N.I., Romanov V.G., Ryaboy V.Z. Seismic studies of low velocity layer and horizontal inhomogeneities within the crust and upper mantle of the territory of the USSR. — Tectonophysics, 1973, 20.
- Alexander S.S., Prinney R.A. A study of the core–mantle boundary using P waves diffracted by the earth's core. — J. Geophys. Res., 1966, 71(24), 5943–5958.
- Alsop L.E., Sutton G.H., Ewing M. Free vibrations of the earth observed on strain and pendulum seismographs at Ogdensburg. — J. Geophys. Res., 1961, 66, N 2, 631.
- Alterman Z., Abramovici F. The motion of a sphere caused by the motion of the surface of an elastic solid sphere. — Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 1966, 11, 189–224.
- Alterman Z., Jarosch H., Pekeris C.L. Oscillations of the Earth. — Proc. Roy. Soc. London, 1959, A252, 80.
- Alterman Z., Jarosch H., Pekeris C.L. Geophys. J., 1961, 4—Jeffreys Jubilee vol., 219.
- Anderson D.L. Elastic wave propagation in layered anisotropic media. — J. Geophys. Res., 1961, 66, 2953–2963.
- Anderson D.L. The plastic layer of the earth's mantle. — Scient. Amer., 1962, 207, N 1, 52–59.
- Anderson Don L. Recent evidence concerning the structure and composition of the earth's mantle. — Phys. and Chem. Earth, v. 6. Pergamon Press, 1965.
- Anderson D.L. A review of upper mantle seismic data. — Trans. Amer. Geophys. Union, 1967, 48, N 1, 254.
- Anderson D.L. Latest information from seismic observation. "The Earth's Mantle". T.F. Gaskell (Ed.) London.—N.Y., 1967.
- Anderson Don L. Phase changes in the upper mantle. — Science, 1967, 157, N 3793, 1165–1166, 1171–1173.
- Anderson D.L. Problems of the Earth's deep interior. — C.r. Union géodés. et géophys. internat., 1969, N 15, pt. 1, 78.
- Anderson D.L. Structure and composition of the mantle. — Trans. Amer. Geophys. Union, 1971, 52, N 5, and U.S. National Report 1967–1971. Washington, 1971, 174–175.
- Anderson D.L., Ben-Menahem A., Archaubeau C.B. Attenuation of seismic energy in the upper mantle. — J. Geophys. Res., 1965, 70, 1441–1448.
- Anderson D., Harkrider D. The effect of anisotropy on dispersion of long–period surface waves. — Abstr. Meetings Amer. Geophys. Union, 1962, April.
- Anderson D.L., Julian B.R. Shear velocities and elastic parameters of the mantle. — J. Geophys. Res., 1969, 74, N 12, 3281–3286.
- Anderson D.L., Kovach R.L. Attenuation in the mantle and rigidity of the core from multiply reflected core phases. — Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A., 1964, 51, N 2, 168, 172.
- Anderson D.L., Niazi M., Julian B. Upper mantle structure from new body wave travel time, apparent velocity and attenuation data. — Geophys. J., 1966, 11, N 1–2, 253–254.
- Anderson D.L., Sammis Ch. La zona de baja velocidad. — Geofis. Int., 1969, 9, N 1–3, 3–12.
- Anderson D.L., Sammis C., Jordan T. Composition and evolution of the mantle and core.— Science, 1971, 171, N 3976.

- Anderson D.L., Toksöz M.N. Surface waves on a spherical Earth. — *J. Geophys. Res.*, 1963, 68, N 11.
- "Annals of the International Geophysical Year". — London—N.Y.—Paris. Pergamon Press.
- Ansorge J. Die Struktur der Erdkruste an der Westflanke der Zone von Ivrea. — *Schweiz mineral. und petrogr. Mitt.*, 1968, 48, N 1, 247–254.
- Ansorge J., Mayer-Rosa D. Evidence of velocity reversals within the upper mantle in Europe from body-wave observations. — *Proc. X Assembly of the ESC. I, M.*, "Nauka", 1970.
- Ansorge J., Mueller St. The fine structure of the upper mantle in Europe and in North America. — *Commun. Observ. Roy. Belg. Sér. géophys.*, 1971, N 101, 196–197.
- Archambeau C.B. Earth structure from the inversion of surface-wave dispersion data. (Abstr.). — *Geol. Soc. America. Spec. Papers*, 1962, N 68, 3.
- Archambeau Ch., Anderson L. Inversion of surface wave dispersion data. — *Publ. Bur. Centr. seismol. internat.*, 1964, N 23, 45–54.
- Archambeau C.B., Flinn E.A. Perturbation theory of the inversion of body wave travel time data.
- Archambeau C.B., Flinn E.A., Lambert D.G. Fine structure of the upper mantle. — *J. Geophys. Res.*, 1969, 74, 25.
- Aric K., Hirschleggen H.B., Weigel W. Ergebnisse seismischer Messungen in Bereich der Grossen Meteor-Bank. — *Z. Geophys.*, 1968, 34, N 5, 533.
- Arora S.K. A study of the Earth's crust near Gauribidanur in Southern India. — *Bull. Seismol. Soc. America*. 1971, 61, N 3, 671–683.
- Arora S.K., Varghese T.G., Krishnan C.A. Some aspects of the structure of southern India based on recent Bhadrachalam earthquakes. — *Nature*, 1970, 225, N 5229, 261–262.
- Arroyo L.A., Payo G., Prensa M. Etude systématique de la structure du manteau supérieur dans le Continent eurasiatique et l'Afrique. — *C.r. Union géodés. et géophys. internat.*, 1969, N 15, pt 1, 141–142.
- Asada T., Takano K. Attenuation of short period P-waves in the mantle. — *Phys. Earth*, 1963, 11, N 1.
- Asbell I.G., Keilis-Borok V.I., Yanovskaya T.B. A technique of a joint interpretation of travel-time and amplitude-distance curve in the upper mantle studies. — *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 1966, 11, 25–55.
- Aubrat J., Giese P., Pascal G., Perrier G., Puntous R., Recq M., Simonin A. Structure de la croûte terrestre dans les Alpes occidentales et la vallée du Rhône. — *C.r. Acad. sci. Paris*, 1967, D265, N 7, 533–536.
- Babuška V. Elastic anisotropy of the upper mantle and the Mohorovičić discontinuity. — *Stud. geophys. et géod.*, 1970, 14, N 3, 296–309.
- Backus G.E. Possible forms of seismic anisotropy of the upper most mantle under oceans. — *J. Geophys. Res.*, 1965, 70, N 14, 3429–3439.
- Backus G., Gilbert F. Numerical application of a formalism for geophysical inverse problems. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 1967, 13, 247–176; 1968, 16, 169.
- Backus G., Gilbert F. Uniqueness in the transversion of inaccurate gross Earth data. — *Philos. Trans. Roy. Soc. London*, 1970, A266, N 1173, p. 123–192.
- Balakina L.M., Shirokova H.I., Vvedenskaya A.B. Double refraction in anisotropic layers and some peculiarities of low velocity layer in earth's mantle. — *Publ. Bur. Centr. seismol. internat.*, 1961, A, N 21, 87–98.
- Balakrishna S. A peep into the depths of the Earth. — *Indian Minerals*. 1957, 11, N 1, 25–30.
- Baltenberger P. Structure de la croûte terrestre le long d'un profil Grand Chartreuse–Morvan–Puisaye d'après les tirs du lac Nègre de Septembre 1966. — *C.r. Acad. sci. Paris*, 1967, D264, N 25, 2880–2883.
- Barazangi M., Isacks B. Lateral variations of seismic wave attenuation in the upper mantle above the inclined earthquake zone of the Tonga Island arc deep anomaly in the upper mantle. — *J. Geophys. Res.*, 1971, 76, N 35, 8493–8516.
- Barazangi M., Isacks B., Oliver J. Propagation of seismic waves through and beneath the lithosphere that descends under the Tonga Island arc. — *J. Geophys. Res.*, 1972, 77, N 5, 952–958.
- Barnier L. La structure du Globe. — *Geographia*, 1959, N 88, 2–121.
- Barr K.G. Upper mantle structure in Canada from seismic observations using chemical explosion. — *Canada. J. Earth Sci.*, 1967, 4, N 5, 961–975.
- Barr K.G. Evidence for variations in the upper mantle velocity in the Hudson Bay area. — *Paper Geol. Surv. Canada*, 1968, N 53, 365–376.
- Barr K.G. Crustal refraction experiment: Yellowknife 1966. — *J. Geophys. Res.*, 1971, 76, N 8, 1929–1947.

- Barr K.G., Robson G.R. Seismic delays in Eastern Caribbean. — *Geophys. J.*, 1963, 7, N 3, 342–350.
- Barrell J. The strength of the earth's crust. — *J. Geol.*, 1914, 22, 23.
- Basham P.W., Mitham K. Seismological detection and identification of underground nuclear explosions. — *Publ. Earth Phys. Branch Dept Energy Mines and Resources Ottawa*, 1971, 41, N 9, 141–182.
- Bates D.R. The planet Earth. — London — N.Y. — Paris—Los Angeles, Pergamon Press, 1957.
- Båth M. Shadow zones, travel times and energies of longitudinal seismic waves in the presence of an asthenosphere low-velocity layer. — *Trans. Amer. Geophys. Union*, 1957, 38, N 4, 529–538.
- Båth M. A continental channel wave guided by the intermediate layer in the crust. — *Geophys. pura e appl.*, 1957, 38.
- Båth M. Channel waves. — *J. Geophys. Res.*, 1958, 63, N 3, 583–587.
- Båth M. Seismic channel waves, new observations and discussions. — *Gerlands Beiträge Geophys.*, 1959, 685.
- Båth M. Seismic surface wave dispersion; a world-wide survey. — *Geofis. pura e appl.*, 1959, 43, N 2, 131–147.
- Båth M. SCrustal structure in Iceland and surrounding ocean. — *ICSU*, 1962, 4, N 3, 127–133.
- Båth M. Future développement des réseaux de stations sismologiques. — *Scientia*, 1964, 99, N 9–10, 184, 191.
- Båth M. Propagation of Sn and Pn to teleseismic distance — *Pure and Appl. Geophys.* 1966, 64, N 11.
- Båth M., Arroyo A.L. Pa and Sa waves and the upper mantle. — *Geofis. pura e appl.*, 1963, 56, N 3.
- Båth M., Vogel A. Continental dispersion of seismic waves. — *Geofis. pura e appl.*, 1957, 38, 10–18.
- Beaufils Y., Mechler P., Rocard Y. Sur les hétérogénéités du manteau supérieur sous le territoire de la France. — *C.r. Acad. sci. Paris*, 1970, 270, N 14, B926–B928.
- Beaufils Y., Mechler P., Rocard Y. Variations d'une couche de discontinuité de propagation sismique vers 600 km de profondeur. — *C.r. Acad. sci. Paris*, 1970, 270, N 16, B1070–1072.
- Behrens J., Dresen L., Waniek L. Investigation on two seismic test-models and three-dimensional. — *Commun. Observ. Roy. Belg. Sér. géophys.*, 1971, N 101, 160–165.
- Belousov V.V., Kosminskaya I.P. Structure and development of transition zones between continents and oceans. — *Canad. J. Earth's Sci.*, 1962, 27, N.4, pt 2.
- Benioff H. Orogenesis and deep crustal structure — additional evidence from seismology. — *Bull. Seismol. Soc. America*, 1954, 65, 385.
- Benioff H. Long waves observed in the Kamchatka earthquake of November 4, 1952. — *J. Geophys. Res.*, 1958, 63, N 3, 589–593.
- Benioff H., Gutenberg B., Press F., Richter C.F. Progress report. seismological laboratory of the California Institute of Technology, 1957. — *Trans. Amer. Geophys. Union*, 1958, 39, N 4, 721–725.
- Benioff H., Gutenberg B., Richter C.F. Progress Report. Seismological Laboratory of the California Institute of Technology, 1953. — *Trans. Amer. Geophys. Union*, 1954, 35, 979.
- Benioff H., Gutenberg B., Richter C.F. Seismological Laboratory Report. — *Trans. Amer. Geophys. Union*, 1954, 35, 985.
- Benioff H., Press F., Smith S. Excitation of the free oscillations of the earth by earthquakes. — *J. Geophys. Res.*, 1961, 66, N 2, 605–619.
- Ben-Menachem A., Toksöz N. Source mechanism from spectra of long-period seismic surface waves. 1. The Mongolian earthquake of December 4 1957, — *J. Geophys. Res.*, 1962, 67, N 5.
- Ben-Menachem A., Toksöz N. Source mechanism from spectra of long-period seismic surface waves. 2. The Kamchatka earthquake of November 4 1952. — *J. Geophys. Res.*, 1963, 68, N 2.
- Ben-Menachem A., Toksöz N. Source mechanism from spectra of long-period seismic surface waves. 3. The Alaska earthquake of July 10 1958. — *Bull. Seismol. Soc. America*, 1963, 53, N 5.
- Benndorf H. Über die Art der Fortpflanzung der Erdbebenwellen Erdinnern. — *Mitteilungen der Erdbeben-Kommission*, I. 1905, N 29; II. 1906, N 31, S. 38.
- Berg J.W. Jr., Long L.T., Sarman S.K., Trembly L.D. Crustal and mantle inhomogeneities as defined by attenuation of short-period P waves. /*Struct. and Phys. Propert. Earth's Crust.* Washington D.C. 51–57. Discuss. 57.
- Berry M.J., Knopoff L. Rayleigh wave phase velocity studies in the region of the western Mediterranean Sea. — *Trans. Amer. Geophys. Union*, 1966, 47, N. 3, 490.

- Berry M.J., Knopoff L. Structure of the upper mantle under the western Mediterranean basin. *J. Geophys. Res.*, 1967, 72, N 14, 3613-3626.
- Berry M.J., Knopoff L., Müller S. The low-velocity layer in the upper mantle under the Western Mediterranean Sea from phase velocity of Rayleigh waves. - Papers 9th Assembly Europ. Seismol. Commiss., Copenhagen, 1966. København, 1967, 209-211.
- Berry M.J., Knopoff L., Mueller St. The low-velocity channel of the upper basin. *Rapp. et proc.-verb. réun. Commiss. internat. explorat. scient. mer. Méditerran. Monaco*, 1969, 19, N 4, 669-670.
- "Bibliography". - *Trans. Amer. Geophys. Union* 1955, 36, N 6, 1091-1102.
- Birch F. Remarks on the structure of the mantle, and its bearing on the possibility of convection currents. - *Trans. Amer. Geophys. Union*, 1951, 32, 533.
- Birch F. Elasticity and constitution of the Earth's interior. - *J. Geophys. Res.*, 1952, 57, 228-285.
- Birch F. Composition of the Earth's mantle. - *Geophys. J.*, 1961, 4 (Jeffreys vol.)
- Biswas N.N. P-wave travel time anomalies: Aleution-Alaska region. - *Tectonophysics*, 1973, 19, N 4.
- Bisztricsany E. Computation of Earth's crust structure and the depth of LVL in Carpathian basin. - Reports 13 General Assembly ESC. Roumanie, September 1972.
- Bloch S., Hales A.L., Landisman M. Velocities in the crust and upper mantle of Southern Africa from multimode surface wave dispersion. - *Bull. Seismol. Soc. America*, 1969, 59, N 4, 1599-1629.
- Blundell D.J., Parks R. A study of the crustal structure beneath the Irish Sea. - *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 1969, 17, N 1, 45-62.
- Bolt B. Recent information on the earth's interior from studies of mantle waves and eigen vibrations. - *Phys. and Chem. Earth*, v. 5. Oxford-London, N.Y.-Paris, Pergamon Press, 1964, p. 55-119.
- Bolt B.A. Gradients of travel-time curves from deep-focus earthquakes. - *Revs Geophys.*, 1965, 3, N 1, 83-98.
- Bolt B.A., Marussi A. Eigen vibrations of the earth observed at Trieste. - *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 1962, 6, N 3, 299-311.
- Bolt B., Nuttli O. P-wave residuals as a function of azimuth. 1. Observations. - *J. Geophys. Res.*, 1966, 71 (24), 5977-5985.
- Bonatti E. Ancient continental mantle beneath oceanic ridges. - *J. Geophys. Res.*, 1971, 76, N 17, 3825-3831.
- Bossolasco M., Claudio E. la propagations delle onde longitudinali sotto l'Europa sud-orientale prime d'eduzioni sulla struttura del mantello superiore. - *Geofis. e meteorol.*, 1969, 18, N 1-2, 7-13.
- Bott M.H.P. The upper mantle beneath Iceland. - *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 1965, 9, N 2-3, 275-277.
- Bott M.H.P. The interior of the Earth. London, 1971.
- Bram K., Giese P. Die Geschwindigkeitteilung. Der P-Welle in der Erdkruste im Raum Augsburg (Süd-Deutschland). Ergebnisse und Vergleich zweier seismischer Messungen. - *Z. Geophys.*, 1968, 34, N 6, 611-626.
- De Bremaecker J.C. Use of amplitudes. 1, Pn from 3° to 23°. - *Bull. Seismol. Soc. America*, 1955, 45, 219-244.
- Brooks J.A. Seismic wave velocities in the New Guinea. - Solomon Island region. - *Geophys. Monogr.*, N 6. "The crust of the Pacific Basin". Washington. A.G.U., 1962.
- Brooks J.A. Rayleigh waves in Southern New Guinea: I. Higher mode group velocities. - *Bull. Seismol. Soc. America*, 1969, 59, N 2, 945-958.
- Brown R.J. Studies of P-wave arrival parameters and lateral inhomogeneity in the earth. - *Acta Univ. Uppsala Abstr. Uppsala Diss. Fac. Sci.*, 1972, N 227, 12 p.
- Brune J. Radiation pattern of Rayleigh waves from the Southeast Alaska earthquake of July 10 1958. - A Symposium on Earthquake Mechanism. - *Publ. Dominion Obs.*, 1960, 24, 10.
- Brune J. Radiation pattern of Rayleigh wave from the southeast Alaska earthquake of July 10 1958. - *Publ. Dominion Observ.*, 1961, XXIV.
- Brune J. The Sa phase from the Hindu Kush earthquake of July 6 1962. - *Pure and Appl. Geophys.*, 1965, 62, N 3.
- Brune J.N. Regional variation in the structure of the upper mantle and the propagation of the Sa-phase. - *Papers Geol. Surv. Canada*, 1966, N 15, 441-444.
- Brune J.N., Benioff H., Ewing M. Long-period surface waves from the Chilean earthquake of May 22 1960. recorded on linear strain seismographs. - *J. Geophys. Res.*, 1961, 66, N 9, 2895-2910.

- Brune J., Dorman J. Seismic waves and Earth structure in the Canadian shield. — Bull. Seismol. Soc. America, 1963, 53, N 1, 167–209.
- Brune J., Ewing M., Kuo J. Group and phase velocities for Rayleigh waves of period greater than 380 sec. — Science, 1961, 133.
- Brune J.N., Nafe J.E., Alsop L.E. The polar phase shift of surface waves on a sphere. — Bull. Seismol. Soc. America, 1961, 51, N 2, 247–257.
- Brune Y., Nafe Y.E., Oliver Y. A simplified method for the analysis and synthesis of dispersed wave trains. — J. Geophys. Res., 1960, 60(1).
- Bucher R.L., Smith R.B. Crustal structure of the eastern Basin and Range Province and the northern Colorado Plateau from phase velocities of Rayleigh waves. — Struct. and Phys. Propert. Earth's Crust. Washington D.C., 59–70. Discuss, 70.
- Bullard E.C. The Earth as a planet. — Univ. Chicago Press, 1953, p. 57.
- Bullard E.C. The density within the Earth. — Verhandel. Koninkl. nederl. geol.-Minjunbouwkund. genootschap, geol. ser., Deel 18, 1957.
- Bullen K.E. The ellipticity correction to travel-times of earthquake waves. — Monthly Notices Roy. Astron. Soc., Geophys. Suppl., (1937–1939), 1, 143–157, 317–331, 332–335, 469–471.
- Bullen K.E. Composition of the Earth at a depth of 500–700 km. — Nature, 1938, 142, 671.
- Bullen K.E. The problem of the Earth's density variation. — Bull. Seismol. Soc. America, 1940, 30, 235–250.
- Bullen K.E. The density variation of the Earth's central core. — Bull. Seismol. Soc. America, 1942, 32, 19–29.
- Bullen K.E. Features of the travel time curves of seismic waves. — Monthly Notices Roy. Astron. Soc., Geophys. Suppl., 1945, 5.
- Bullen K.E. Compressibility — pressure hypothesis and the Earth's interior, Monthly Notices Roy. Astron. Soc., Geophys. Suppl., 1949, 5, 355–368.
- Bullen K.E. An introduction to the theory of seismology. London and N.Y., Cambridge Univ. Press, 1953.
- Bullen K.E. Seismology. — Methuen Monographs on physical subject. London. — N.Y., 1954.
- Bullen K.E. Some trends in modern seismology. — Sci. Progr., 1955, 43, N 170, 2211–227.
- Bullen K.E. The interior of the Earth. — Scient. Amer., 1955, 193, N 3, 56–61.
- Bullen K.E. Seismic wave transmission. — Encyclopedia of Physics, v. 47, S. Flüge (Ed.). Berlin, Springer, 1956, p. 75–117.
- Bullen K.E. Seismology and the broad structure of the earth's interior — Phys. and Chemistry Earth. I. London — N.Y., 1956, 1, p. 68–93.
- Bullen K.E. Seismology and the Earth's deep interior. Australian Academy of Science: Second Annual General Meeting Symposium. — Austral. J. Sci., 1956, 2, N 3, 99–100.
- Bullen K.E. The deep interior. — Planet Earth. Pergamon Press. 1957, (31–47).
- Bullen K.E. Aspects of research on the earth's interior, with special reference to seismology. — Austral. J. Sci., 1958, 21, N 4, 93–99.
- Bullen K.E. Note on cusps in seismic travel times. — Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 1960, 3, N 2, 354–359.
- Bullen K.E. Seismic travel times and velocity distributions. — Puols Centr. Séismol. internat., 1961, A, N 21, 7–13.
- Bullen K.E. Oscillations of the earth and the earth's deep internal structure. — Austral. J. Sci., 1962, 24, N 7, 303–307.
- Bullen K.E. An introduction to the theory of seismology. Cambridge Univ. Press. I ed. — 1947; II — 1953; III — 1963.
- Bullen K.E. Evidencia sísmica y conexa sobre la estructura del manto superior de la tierra. — Geofis. internac., 1967, 7, N 2, 31–41.
- Bullen K.E., Haddon R.A.W. Evidence from seismology and related sources on the Earth's present internal structure. Phys. Earth and Planet. Internat., 1970, 2, N 5, 342–349.
- Burke-Cuffney T.B., Bullen K.E. Seismological and related aspects of the 1954 hydrogen bomb explosions. — Austral. J. Phys., 1957, 10, N 1.
- Byerly P. The Montana earthquake of June 28 1925. — Bull. Seismol. Soc. America, 1926, 16, N 4, 209–265.
- Byerly P. 16. The analysis of seismograms of near earthquakes, p. 189–170. 17. The records of earthquakes in intermediate and distances, p. 171–189. 18. Time-distance curves, 189–197. 19. Reduction of trace amplitudes, 198–205. 20. Seismic geography, 206–216. — Physics of the Earth, ch. VI. Seismology. — Bull. Nat. Res. Council., 1933, N 90.
- Byerly P. Dubcontinental structure in the light of seismological evidence. — Advances Geophys., 3, N Y., 1956, 105–152.

- Byerly P., Meil I., Romney C. Dependence on azimuth of amplitudes of P and PP. — Bull. Seismol. Soc. America, 1949, 39, 269–284.
- Cailleux A. L'anatomie de la terre. Paris, Hachette, 1968.
- Caloi P. Onde Longitudinali e trasversali guidate dell'astenosfera. — Atti Accad. naz. Lincei. Rend. Cl. sci. fis. — mat. e natur., 1953, ser. 8, 15, N 6, 352–357.
- Caloi P. L'astenosfera come canale-guida dell'energia sismica. — Ann. geofis., 1954, 7, N 4, 491–501.
- Caloi P. C<sub>ij</sub>. — Ann. Geophys., 1955, 8, N 3, 293–313.
- Caloi P. La sismologia nell'ultimo cinquantennio. — Scientia (Ital.), 1957, 92, N 4, 133–140.
- Caloi P. The crust of the earth, from the Apennines to the Atlantic, reconstructed in accordance with the data supplied by seismic surveys. — Z. Geophys., 1958, 24, 65–95.
- Caloi P. L'astenosfera; sua esistenza; sua caratteristiche. — Scientia, 1958, 93, N 9, 231.
- Caloi P. On the upper mantle. — Advances Geophys. v. 12, N.Y.—London. Acad. Press, 1967, p. 79–211.
- Carder D.S. Seismic waves from nuclear explosion and the structure under western Pacific. — Preprints Internat. Oceanogr. Congress. 1959, Washington.
- Carder D.S. Mantle structure as inferred from seismic-wave travel-times from nuclear explosions in the Central Pacific. — Geol. Soc. America Spec. Papers, 1963, N 73, 30–31.
- Carder D.S. Travel times from Central Pacific nuclear explosions and inferred mantle structure. — Bull. Seismol. Soc. America, 1964, 54, N 6, 2271–2294.
- Carder D.S. Upper mantle structure inferred from P-wave travel-times 10 to 40°. Earthquake Notes Seismol. Soc. America, 1968, 39, N 1–2, 19.
- Carder D.S., Bailey L.E. Seismic wave travel times from nuclear explosions. — Bull. Seismol. Soc. America, 1958, 48, N 4, 377.
- Carder D.S., Gordon D.W., Jordan J.N. Analysis of surface focus travel times. — Bull. Seismol. Soc. America, 1966, 56, N 4, 815–840.
- Carder D.S., Qamar A., McEvelly T.V. Trans-California seismic profile Pahute Mesa to San Francisco Bay. — Bull. Seismol. Soc. America, 1970, 60, N 6, 1829–1846.
- Carder D.S., Tocher D., Bufe C.H., Stenart S.W., Eisler J., Berg E. Seismic wave arrivals from Longshot, 0° to 27°. — Bull. Seismol. Soc. America, 1967, 57, N 4.
- Carpenter E.W., Davies D. Frequency dependent seismic phase velocities; an attempted reconciliation between the Jeffreys/Bullen and the Gutenberg models of the upper mantle. — Nature, 1966, 212, N 5058, 134–135.
- Carr M.J., Stoiber R.E., Drake C.L. Discontinuities in the deep seismic zones under the Japanese arcs. — Bull. Geol. Soc. America, 1973, 84, N 9, 2917–2929.
- Chakraborty S.K. Oscillations of the earth and their use in the study of the internal constitution of the earth. — Bull. Calcutta Math. Soc., 1971, 63, N 1, 11–17.
- Chatterjee S.N. On the dispersion of Love waves and crust mantle structure in the Gangetic basin. — Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 1971, 23, N 2, 129–138.
- Chiburis E.F. Crustal and sub-crustal investigations in the Pacific Northwest states from surface wave dispersion. — Trans. Amer. Geophys. Union, 1965, 46, N 1, 156.
- Chinnery M.A. Evidence for lateral variations in the lower mantle (abstract). — Trans. Amer. Geophys. Union, 1966, 47, N 1, 44.
- Chinnery M.A., Toksöz M.N. P-wave velocities in the mantle below 700 km. — Bull. Seismol. Soc. America, 1967, 57, N 2, 199–226.
- Choudhury M.A. P-wave attenuation in the mantle. — Z. Geophys., 1972, 38, N 3, 447–453.
- Choudhury M.A., Labrousse Y., Perrier G. Anomalies of the upper mantle in France. Recording and computation methods. — Nuovo cimento, suppl., 1968, 6, N 1, 96–97.
- Choudhury A.M., Perrier G. Structure du manteau supérieur d'après les durées de propagation des ondes longitudinales. — C.r. Acad. sci., Paris, 1965, 261, N 2, 5581–5584.
- Choudhury M.A., Perrier G. Anomalie du manteau supérieur en France. — Papers 9 Assembly ESC, Copenhagen, 1966.
- Christensen N.I., Cadson R.S. Seismic anisotropy in the upper mantle. — Tectonophysics, 1968, 6, N 2, 93–107.
- Chúqui L. A simple model of the crust and upper mantle in Central Chile. — Bull. Seismol. Soc. America, 1973, 63, N 3, 819–825.
- Cleary J.R. Crustal structure of Australia and New Guinea. — Тезисы докладов на 15й Генеральной ассамблее МГТС. М., 1971.
- Cleary J., Hales A.L. Revision of mantle P velocities and core radius. — Trans. Amer. Geophys. Union, 1965, 46, N 1, 157.
- Cleary J., Hales A.L. Azimuthal variation of U.S. station residuals. — Nature, 1966, 210, 619–620.
- Cleary J.R., Simpson D.W., Muirhead K.J. Variations in Australian upper mantle structure from observations of the Connikin explosion. — Nature, 1972, 236, N 5342, 111–112.

- Clowes R.M., Kanasewich E.R., Cumming G.L. Deep crustal seismic reflection at near-vertical incidence. — *Geophysics*, 1968, 33, N 3, 441–451.
- Collette B.J.A. A crustal refraction profile of Flamborough Head (North Sea). — *Trans. Amer. Geophys. Union*, 1966, 47, N 1, 193–194.
- Cook K.L. The problem of the crust–mantle mix. — *Advances Geophys.*, 1962, 9.
- Coulomb J. L'expansion des fonds océaniques et la dérive des continents. Paris, 1969.
- Crampin S. Higher modes of seismic surface waves preliminary observations. — *Geophys. J.*, 1964, 9, 37–57.
- Crampin S., Bath M. Higher modes of seismic surface waves mode separation. — *Geophys. J.*, 1965, 10, 81–92.
- Crust of the Earth. A symposium. Poldevraat A.N.T. (Ed.), 1955, VIII, 762 p.
- Cumming G.L., Kanasewich E.R. Seismic arrivals from the earth's upper mantle. — *Nature*, 1965, 206, N 1981, 248–249.
- Dahm C.G. Epicenter of the Hawke Bay (New Zealand) earthquake and travel times of condensation waves. — *Bull. Seismol. Soc. America*, 1933, 23, 139–157.
- Dahm C.G. A study of dilatational wave velocity in the earth as a function of depth, based on a comparison of the P, P' and PcP phases. Dissertation. St. Louis Univ., 1934.
- Dahm C.G. Velocity of P waves in the earth calculated from the Macelwane P curve, 1933–*Bull. Seismol. Soc. America*, 1936, 26, 1–11.
- Dahm C.G. Velocities of P and S waves calculated from the observed travel times of the Long Beach earthquake. — *Bull. Seismol. Soc. America*, 1936, 26, 159, 171.
- Dainty A.M., Ewing G.N., Blanch J.E., Keen M.J. Seismic studies within the Appalachian system on the eastern sea-board of Canada. — *Trans. Amer. Geophys. Union*, 1965, 46, N 1, 106–107.
- Daly R.A. Strength and structure of the Earth. N.Y., Prentice–Hall, 1940.
- Davies D. On the problem of compatibility of surface wave data. Q and body wave travel times. — *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 1967, 13, N 4, 421–424.
- Dehlinger P., Chiburis E.F., Collver M.M. Local travel–time curves and their geological implications for the Pacific North–West States. — *Bull. Seismol. Soc. America*, 1965, 55, N 3.
- Demenitskaya R.M., Karasik A.M., Kiselev Iu.G., Litvinenko I.V., Ushakov S.A. The transition zone between the Eurasian continent and the Arctic Ocean. — *Canad. J. Earth Sci.*, 1968, 5, N 4, pt 2, 1125–1129.
- Den N., Ludwig W.J., Murauchi S., Ewing J.I., Hotta N., Edgar N.T., Yoshii T., Asanuma T., Hagiwara K., Sato T., Ando S. Seismic–refraction measurements in the north–west Pacific basin. — *J. Geophys. Res.*, 1969, 74, N 6, 1421–1434.
- Derr J.S. Internal structure of the earth inferred from free oscillations. — *J. Geophys. Res.*, 1969, 74, N 22, 5202–5220.
- Dogble H.J., Webb J.P. Travel–time to Australian stations from Pacific nuclear explosions in 1958. — *J. Geophys. Res.*, 1963, 68, N 4.
- Dorel M.J. Quelques résultats sismiques sur l'Afrique occidentale. — *C.r. Acad. Sci. Paris*, 1968, D266.
- Dorman J., Ewing M. Numerical inversion of surface wave dispersion data and crust–mantle structure in the New York–Pennsylvania Area. — *J. Geophys. Res.*, 1962, 67, N 9, 3554, N 13, 5227–5241.
- Dorman J., Ewing M., Oliver J. Study of shear–velocity distribution in the upper mantle by Mantle Rayleigh waves. — *Bull. Seismol. Soc. America*, 1960, 50, N 1, 87.
- Drake Ch.L., Nafe J.E. The transition from ocean to continent from seismic refraction data. — The crust and upper mantle of the Pacific area. Washington, 1968.
- Dowling J.J. Note on reversing the Gnome profile in the northeastern United States. — *Geol. Soc. America. Spec. Papers*, 1966, N 87, 324.
- Dowling J.J. Uncertainties in velocities determined by seismic refraction. — *J. Geophys. Res.*, 1970, 75, N 32, 6690–6692.
- Dube R.K. Pa and Sa waves in Taiwan earthquake of 18 January 1964. — *Indian J. Meteorol. and Geophys.*, 1965, 16, N 3.
- Dube R.K. Upper mantle structure in and around the Indian sub–continent. — *Indian J. Meteorol. and Geophys.*, 1969, 20, N 1, p. 47.
- Dube R.K. Upper mantle structure in and around the Indian sub–continent (from S–waves). — *Indian J. Meteorol. and Geophys.*, 1970, 21, N 2, 291–294.
- Dubois J. Propagation of P waves and Rayleigh waves in Melanesia structural implications. — *J. Geophys. Res.*, 1971, 76, N 29, 7217–7240.
- Duda J.S. Secular seismic energy release in the Circum–Pacific belt. — *Tectonophysics*, 1965, 2, N 5.
- Dziwonski A.M. Upper mantle models from "pure–path" dispersion data. — *J. Geophys. Res.*, 1974, 76, N 11, 2587–2601.

- Eaton J.P. Crustal structure and volcanism in Hawaii. — The crust of the Pacific basin. — Amer. Geophys. Union Monogr., 1962, N 6.
- Eaton J.P. Crustal structure in northern and central California from seismic evidence. — Bull. Calif. Div. Mines and Geol., 1968, N 190.
- Eaton J.P., Healy J.H., Jackson W.H., Pakiser L.C. Upper mantle velocity and crustal structure in the eastern Basin and Range province determined by SHOAL and chemical explosions near Delta, Utah. — Geol. Soc. America Spec. Paper, 1965, N 82, 250–251.
- Egyed L. Investigation on seismology and the physics of the interior of the Earth in Hungary, 1954–1956. — Acta techn. Acad. sci. hung., 1957, 18, N 1–2, 123–131.
- Enayatollah M.A. Continental—array P—wave velocities in the mantle. — Pure and Appl. Geophys., 1972, 94, N 2, 136–147.
- Enescu D., Cornea I., Constantinescu P., Radulescu Fl., Ratsut St. Structura scoartei terestre si a mantelei superioare in zona curburii Carpatilor. — Studii și cercetari geol., geofiz., geogr. Ser. geofiz., 1972, 10, N 1, 23–41.
- Engdahl E.R., Flinn E.A. Seismic waves refracted from discontinuities within earth's upper mantle. — Science, 1969, 163, N 3863, 177–179.
- Ewing M. The crust and mantle of the Earth. Geophys. and 'GY. Washington D.C., Amer. Geophys. Union, 1958.
- Ewing W.M. Sediments of ocean basins. — Contrib. Lamont Geol. Obs., 1963, N 632.
- Ewing J.I. The mantle rocks. — Sea, v. 3. N.Y.—London, Interscience, 1963, p. 103–109.
- Ewing J., Ewing M. Seismic refraction measurements in the Atlantic Ocean basin in the Mediterranean Sea, on the Mid—Atlantic ridge and the Norwegian Sea. — Bull. Geol. Soc. America, 1959, 70, 291–318.
- Ewing J., Ewing M. Seismic refraction measurements in the Scotia Sea and South Sandwich Island Arc. Preprints Internat. Oceanogr. Congress 1959. Washington D.C. 1959, 22–23.
- Ewing J., Ewing M. Marine seismic studies. — Trans. Amer. Geophys. Union, 1966, 47, N 1, 276–279.
- Ewing J., Houtz R. Mantle reflections in airgun—sonobuoy profiles. — J. Geophys. Res., 1969, 74, N 27, 6706–6709.
- Ewing M., Jardetzky W., Press F. Elastic waves in layered media. N.Y., 1957.
- Ewing M., Kuo J., Brun J.N. Surface wave studies of the Pacific crust and mantle. 10th Pacif. Sci. Congr. Pacif. Sci. Assoc. Honolulu, 1961, 358.
- Ewing M., Landisman M. Shape and structure of ocean basins. — Preprints Oceanogr. Amer. Assol. Advanc. of Sci, 1961.
- Ewing M., Mueller S., Landisman M., Sato Y. Transient analysis of earthquake and explosion arrivals. — Geofis. pura—Appl., 1959, 44, 83–118.
- Ewing M., Press F. An investigation of mantle Rayleigh waves. — Bull. Seismol. Soc. America, 1954, 44, N 2A.
- Ewing M., Press F. Mantle Rayleigh waves from the Kamchatka earthquake of November 4 1952. — Bull. Seismol. Soc. America, 1954, 44, N 3.
- Ewing M., Press F. Surface waves and guided waves. — Encyclopedia of Physics, v. 47. Flügge (Ed.) Berlin, Springer, 1956, p. 119–139.
- Ewing M., Press F. Rayleigh—wave dispersion in the period range 10 to 500 seconds. — Trans. Amer. Geophys. Union, 1956, 37, N 2, 213.
- Ewing M., Press F. Determination of crustal structure from phase velocity Rayleigh waves. Pt III. The United States. — Bull. Geol. Soc. America, 1959, 70, 229–244.
- Fairhead J.D., Girdler R.W. Crustal structure of the Gulf of Aden and the Red Sea. — Тезисы докладов на 15-й Генеральной ассамблее МГТС. М., 1971.
- Flinn E.A., Archambeau C.B., Lambert D.G. Crust and upper mantle structures from the dispersion of short—period Rayleigh waves. — Trans. Amer. Geophys. Union, 1966, 47, N 3, 490.
- Fournier H.G., Ward S.H., Morisson H.F. Magnetotelluric evidence for the low velocity layer. — Sp. Sci. Lab. Univ. Calif. Berkeley, 1963.
- Francis T.J.G. Upper mantle structure along the axis of the Mid—Atlantic Ridge near Iceland. — Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 1969, 17, N 5, 507–520.
- Francis T.J.G., Raitt R.W. Seismic refraction measurements in the Southern Indian ocean. — J. Geophys. Res., 1967, 72, N 12.
- Francis T.J.G., Shor G.G. Jr. Seismic refraction measurements in the Northwest Indian Ocean. — J. Geophys. Res., 1966, 71, N 2, 427–449.
- Fuchs K. On the determination of velocity depth distributions of elastic waves from the dynamic characteristics of the reflected waves field. — Z. Geophys., 1970, 36, H. 5, 531–548.
- Fuchs K., Mayer—Rosa D., Liebau F. Lateral inhomogeneities of the earth's mantle and their petrological interpretation. — Z. Geophys., 1971, 37, N 6.
- Furumoto A.S., Hussong D.M., Campbell J.F., Sutton G.H., Malahoff A., Rose J.C., Woollard G.P. Crustal and upper mantle structure of the Solomon Islands as revealed by

- seismic refraction survey of November–December 1966. – *Pacific Sci.*, 1970, 24, N 3, 315–332.
- Furumoto A.S., Tompson N.J., Woollard G.P. The structure of Koofau volcano from seismic refraction studies. – *Pacific Sci.*, 1965, 19, N 3.
- Furumoto A.S., Woollard G.P. Seismic refraction studies of the crustal structure of the Hawaiian Archipelago. – *Pacific Sci.*, 1965, 19, N 3.
- Galanopoulos A.G. Note on strain release variation with depth. – *Ann Geophys.*, 1964, 17, N 3.
- Gálfi J., Stegena L. Szeizmikus reflectios meressel meghatározott néhány adat a földkéreg magyarországi részéről. – *Geofiz., közl.*, 1957, 6, N 1–2, 53–60.
- Galitzine B. Sur l'ange d'émergence des rayons sismiques. (Об угле выхода сейсмической радиации). Изв. Пост. Центр. Сейсм. Комиссии, 1919, 7, вып. 2.
- Galkin I.N., Levshenko V.T., Miatshtkin V.I., Nikolaev A.V. Inhomogeneity of the Earth with respect to physical processes of earthquakes. – *Z. Geophys.*, 1972, 38, N 3.
- Gane P.G., Atkins A.R., Sellschop J.P.F., Seligman P. Crustal structure in the Transvaal. – *Bull. Seismol. Soc. America*, 1956, 46, N 4, 293–316.
- Garrick R.A. A reinterpretation of the Wellington crustal refraction profile. Discussion on the paper: "New Zealand crustal structure" by G.A. Eiby. – *N.Z.J. Geol. and Geophys.*, 1968, 11, N 5, 1280–1295.
- Gaskell T.F. Seismic experiments in the Alps. – *Petrol. Times*, 1958, 62, N 1599, 935–937.
- Geiger L., Gutenberg B. Über Erdbebenwellen. VI. Konstitution des Erdinneren, erschlossen aus der Intensität longitudinaler und transversaler Erdbebenwellen und einige Beobachtungen an den Vorläufern. – *Nachr. Ges. Wiss. Gottingen. Math. Phys. Kl.*, 1912, 623–675.
- Gerver M.L. Inverse problem for the one-dimensional wave equation. – *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 1970, 21, 337.
- Gerver M. The inverse problem of seismology. – *Tectonophysics*, 1972, 13, 1–4, 483–496.
- Gerver M., Markushevich V. Determination of a seismic wave velocity from the travel time curve. – *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 1966, N 11.
- Giese P. Versuch einer Gliederung der Erdkruste im Nördlichen Alpenvorland in den Ostalpen und in Teilen der Westalpen mit Hilfe charakteristischer Refraktions. – *Laufzeitkurven sowie eine geologische Deutung, Habilitationsschrift Math. Naturwiss. Fak. Freien Universität, Berlin*, 1966, 143 S.
- Giese P. Der Grenzbereich zwischen Erdkruste und Erdmantel. – *Papers 9th Assembly Europ. Seismol. Commiss., Copenhagen*, 1966. København, 1967, 109–113.
- Giese P. Die Struktur der Erdkruste im Bereich der Ivrea-Zon. Ein Vergleich verschiedener seismisch-geologischen Deutung. – *Schweiz. mineral. und petrogr. Mitt.*, 1968, 48, N 1, 261–284.
- Giese P., Morelli C., Prodehl C., Vecchia O. Crust and Upper Mantle beneath the southern part of the zone of Ivrea. – *Communs Obs. Roy. Belg. Sér. géophys.*, 1971, N 1, 182–183.
- Giese P., Prodehl C., Behnke C. Ergebnisse refraktions-seismischer Messungen 1965 zwischen dem Französischen Zentralmassiv und dem Westalpen. – *Z. Geophys.*, 1967, 33, N 3, 215–262.
- Gilbert F., Backus G.E. Approximate solutions to the inverse normal mode problem. – *Bull. Seismol. Soc. America*, 1968, 58, N 1, 103–131.
- Gilbert F., Backus G.E. Approximate solutions to the inverse normal mode problem. – *Earthquake Notes Seismol. Soc. America*, 1968, 39, N 1–2, 15–16.
- Gilbert F., Macdonald G.J.F. Free oscillation of the earth. – *J. Geophys. Res.*, 1959, 64, 1103.
- Girlands A., Federico B. Sulla discontinuità 20°. – *Atti Accad. naz. Lincei. Rend. cl. sci., fis., mat. e natur.*, 1966, 40, N 1, 64–72.
- Gopalkrishnan P.S. P-wave velocities in the mantle below 700 km. – *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 1969, 17, N 4, 405–413.
- "Greater complexity in the mantle". – *Nature*, 1971, 231, N 5304, 493.
- Green R.W.E., Hales A.L. Travel times in the Central United States for Project Early Rise. – *Trans. Amer. Geophys. Union*, 1967, 48, N 1, 197.
- Green R.W.E., Hales A.L. The travel times of P-waves to 30° in the Central United States and upper mantle structure. – *Bull. Seismol. Soc. America*, 1968, 58, N 1, 267–289.
- Griggs D.T., Press F. Probing the earth with nuclear explosions. – *J. Geophys. Res.*, 1961, 66, N 1, 237–258.
- Guidos R.R., Baker R.G. Channel waves in world-wide collection and evaluation of earthquake data. – *Rept. Texas Instruments Inst. Dallas*, 1963, IV.
- Gumper F., Pomeroy P.W. Seismic wave velocities and Earth structure on the African continent. – *Bull. Seismol. Soc. America*, 1970, 60, N 2, 651–668.

- Gupta H.K., Nara in G. Crustal structure in the Himalayan and Tibet Plateau region from surface wave dispersion. — Bull. Seismol. Soc. America, 1967, 57, N 2, 235–248.
- Gurbus B.M. A study of the earth's crust and upper mantle using travel times and spectrum of body waves. — Bull. Seismol. Soc. America, 1970, 60, N 6, 1921–1935.
- Gutenberg B. Über Erdbebenwellen VIIA, Beobachtungen an Registrierungen von Fernbeben in Göttingen und Folgerungen über die Konstitution des Erdkörpers. — Nachr. Ges. Wiss. Göttingen Math. — Phys. Kl., 1914, 1–52.
- Gutenberg B. Der Aufbau der Erde auf Grund von Erdbebenbeobachtungen. — Geol. Arch., 1923, 1, 3–13.
- Gutenberg B. Der Aufbau der Erde. Berlin, 1925.
- Gutenberg B. Untersuchungen zur Frage, bis zu welcher Tiefe die Erde kristallin ist. — Z. Geophys., 1926, 2, 25–29.
- Gutenberg B. Die Geschwindigkeit der Longitudinalwellen im Erdinnern. — Gerlands Beitr. Geophys., 1927, 17, 356–365.
- Gutenberg B. Der physikalische Aufbau der Erde. — Handbuch der Geophysik, 1930, 2, 440–564.
- Gutenberg B. Beobachtungen von Erdbenenwellen. — Handbuch der Geophysik, 1932, 4, 151–263.
- Gutenberg B. Magnitude determination for deep-focus earthquakes. — Bull. Seismol. Soc. America, 1945, 35, 117–130.
- Gutenberg B. Amplitudes of P, PP and S, and magnitude of shallow earthquakes. — Bull. Seismol. Soc. America., 1945<sub>1</sub>, 35, 57.
- Gutenberg B. On the layer of relatively low wave velocity at a depth of about 80 kilometers. — Bull. Seismol. Soc. America, 1948, 38, 121–148.
- Gutenberg B. The cooling of the earth and the temperature in its interior. Internal constitution of the earth. Dover Publ., 1951, p 150.
- Gutenberg B. Low-velocity layers in the Earth's mantle. — Bull. Seismol. Soc. America., 1951<sub>1</sub>, 41, 143–163.
- Gutenberg B. Wave velocities at the outer portion of the earth's mantle. — Nature, 1952, 170, N 4320.
- Gutenberg B. Wave velocities at depths between 50 and 600 kilometers. — Bull. Seismol. Soc. America., 1953, 43, 223–232.
- Gutenberg B. Travel-times of longitudinal waves from surface foci. — Proc. Nat. Acad. Sci., 1953<sub>1</sub>, 39, 849.
- Gutenberg B. Effects of low-velocity layers. — Geophys. pura e appl., 1954, 28, 1–10.
- Gutenberg B. Address presented at meeting. Internat. Assoc. Seismol. and Phys. Earth's Interior. Rome, Sept., 1954<sub>1</sub>.
- Gutenberg B. Low-velocity layers in the earth's mantle. — Bull. Geol. Soc. America, 1954<sub>2</sub>, 65, 337–348.
- Gutenberg B. Channel waves in the earth's crust. — Geophysics, 1955, 20, N 2, 238–294.
- Gutenberg B. Wave velocities in the Earth's crust. — Geol. Soc. America Spec. Paper, 1955<sub>1</sub>, 62, 19–34.
- Gutenberg B. Neue Ergebnisse über den Aufbau der Erde. — Geol. Rundschau, 1956, 45, N 2, 342–353.
- Gutenberg B. The "boundary" of the earth's inner core. — Trans. Amer. Geophys. Union, 1957, 38, 750–753.
- Gutenberg B. Velocity of seismic waves in the earth's mantle. — Trans. Amer. Geophys. Union, 1958, 39, N 3, 486–489; Bull. Geol. Soc. America, 1958, 69, N 2, part 2, 1686.
- Gutenberg B. The structure of the earth as viewed in 1957. — Scientia, 1958<sub>1</sub>, 93, N 1, 1–6.
- Gutenberg B. Attenuation of seismic waves in the earth's mantle. — Bull. Seismol. Soc. America., 1958, 48, N 3, 269–282.
- Gutenberg B. The asthenosphere low velocity layer. — Ann. geofis., 1959, 12, N 4.
- Gutenberg B. Wave velocity below the Mohorovicic discontinuity. — Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1959<sub>1</sub>, 2, N 4.
- Gutenberg B., Richter C.F. On seismic waves. — Gerlands Beitr. Geophys. 1934, 43; 1935, 45.
- Gutenberg B., Richter C.F. On supposed discontinuities in the mantle of the Earth. — Bull. Seismol. Soc. America, 1931, 21, N 3, p. 216–224.
- Gutenberg B., Richter C.F. On seismic waves. — Gerlands Beitr. Geophys., 1934, 43, 56–133; 1935, 45, 280–360; 1936, 47, 73–131.
- Gutenberg B., Richter C.F. Materials for the study of deep-focus earthquake. — Bull. Seismol. Soc. America, 1936<sub>1</sub>, 26, 341–390.

- Gutenberg B., Richter C.F. Materials for the study of deep-focus earthquakes (second paper). – Bull. Seismol. Soc. America, 1937, 27, 157–183.
- Gutenberg B., Richter C.F. New evidence for a change in physical conditions at depth near 100 kilometers. – Bull. Seismol. Soc. America, 1939, 29, 531–537.
- Gutenberg B., Richter F. Seismicity of the Earth and associated phenomena. Princeton–N.Y., Univ. Press, 1954.
- Guterch A., Materzok, Pajchel J. Seismic structure of the Moho discontinuity in the region of the Foresudetic monocline. – Repts XIII General assembly of the ESC. Roumanie, September 1972.
- Gutowski P.R., Kanasevich E.R. Velocity spectral evidence of upper mantle discontinuities. – Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 1974, 36, N 1, 21–32.
- Haack H. Zur Frage der inneren Gliederung des Gesteinsmantels der Erde. – Forsch. und Fortschr., 1957, 31, N 6, 168–175.
- Hales A.L. The interior of the Earth. – Trans. S. Afric. Inst. Electr. Engrs, 1956, 47, N 8, 248–260.
- Hales A.L. A weak layer in the mantle? – Geophys. J., 1961, N 4.
- Hales A.L. A look at the mantle. – Geotimes, 1964, 2, N 1, 9–13.
- Hales A.L. A seismic discontinuity in the lithosphere. – Earth and Planet. Sci. Letters, 1969, 7, N 1, 44–46.
- Hales A.L. Explosion seismology on land and sea. – Trans. Amer. Geophys. Union, 1971, 52.
- Hales A., Bloch S. Upper mantle structure: are the low velocity layers thin. – Nature, 1969, 221, N 5184, 930–933.
- Hales A.L., Cleary J.R., Doyle H.A., Green R., Roberts J. P-wave station anomalies and the structure of the upper mantle. – J. Geophys. Res., 1968, 73, N 12, 3835–3896.
- Hales A.L., Doyle H.A. P and S travel time anomalies and their interpretation (abstr.) – Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 1967, 13, N 4, 403–415.
- Hales A.L., Helsley C.E., Dowling J.J., Nation J.B. The East Coast onshore/offshore experiment. I. The first arrival phases. – Bull. Seismol. Soc. America, 1968, 58, N 3, 757–819.
- Hales A.L., Helsley C.E., Nation J.B. P-travel times for an oceanic path. – J. Geophys. Res., 1970, 75, N 35, 7362–7381.
- Hall D.H., Hajnal Z. Crustal structure of Northwestern Ontario: refraction seismology. – Canad. J. Earth Sci., 1969, 6, N 1, 81–99.
- Hamilton R.M., Gale A.W. Thickness of the mantle seismic zone beneath the North Island of New Zealand. – J. Geophys. Res., 1969, 74, N 6, 1608–1613.
- Hanson K., Berg E., Gedney L. A seismic refraction profile and crustal structure in central interior Alaska. – Bull. Seismol. Soc. America, 1968, 58, N 5, 1657–1665.
- Hashisume M., Oike K., Asano S., Hamaguchi H., Okada A., Murauchi S., Shima E., Nogoshi M. Crustal structure in the profile across the northeastern part of Honshu, Japan as derived from explosion seismic observation. – Bull. Earth. Res. Inst. Tokyo Univ., 1968, 46, N 3.
- Haskell N.A. The dispersion of surface waves on multilayered media. – Bull. Seismol. Soc. America, 1953, 43, N 1, 17–34.
- Harkrider D. Surface waves in multilayered elastic media. – Bull. Seismol. Soc. America, 1964, 54, 627–679.
- Harkrider D.G., Hales A.L., Press F. On detecting soft layers in the mantle with Rayleigh waves. – Bull. Seismol. Soc. America., 1963, 53, N 3, 539–548.
- Hatherton T. Upper mantle inhomogeneity beneath New Zealand. Surface manifestations. – J. Geophys. Res., 1970, 75, N 2, 269–284.
- Hedervari P. On the distribution of energy and number of earthquakes in accordance with the focal depth. – Ann. geofis., 1964, 17, N 3.
- Hedervari P. Investigations regarding the earth's seismicity. Pt V. On the earthquake geography of the Pacific basin and the seismotectonical importance of the andesite line. Section I: General survey. – Gerlands Beitr. Geophys., 1967, 76, N 5, 394–405.
- HelMBERGER D.V. The crust-mantle transition in the Bering Sea. – Bull. Seismol. Soc. America, 1968, 58, N 1, 179–214.
- HelMBERGER D., Wiggins R.A. Upper mantle structure of midwestern United States. – J. Geophys. Res., 1971, 76, N 14, 3229–3245.
- Herglotz G. Über die Elastizität der Erde bei Berücksichtigung innerer variablen Dichte. – Z. Math. und Phys., 1905, 52, N 3, 275–299.
- Herglotz G. Über das Benndorfsche Problem der Erabeckenstrahlen. – Phys. Z., 1907, 8, 145.
- Herrin E. Travel-time anomalies and structure of the upper mantle (abstract). – Trans. Amer. Geophys. Union, 1966, 47, N 1, 44.
- Herrin E., Arnold E.P., Bolt B.A., Glawson G.E., Engdahl E.R., Freedman H.W., Gordon D.W., Hales A.L., Lobbell J.D., Nuttli O., Romney C., Tag-

- gart J., Tucker W. Seismological tables for P-phases. — Bull. Seismol. Soc. America, 1968, 58, 1193–1351.
- Herrin E., Taggart J. Regional variations in P<sub>n</sub> velocity and their effect on the location of epicentres. — Bull. Seismol. Soc. America., 1962, 52, N 5, 1037–1046.
- Hess H.H. Seismic anisotropy of the uppermost mantle under oceans. — Nature, 1964, 203, 629–631.
- Hill M.N. Recent geophysical exploration of the ocean floor. — Phys. Chem. Earth, 1957, 2, 129–163.
- Hill D.P. Crustal structure of the island of Hawaii from seismic-refraction measurements. — Bull. Seismol. Soc. America, 1969, 59, N 1, 101–130.
- Hill D.P. Crustal and upper mantle structure of the Columbia Plateau from long range seismic refraction measurements. — Bull. Geol. Soc. America., 1972, 83, N 6, 1639–1648.
- Hill D.P., Pakiser L.C. Seismic-refraction study of crustal structure between the Nevada Test Site and Boise, Idaho. — Bull. Geol. Soc. America, 1968, 78, N 6, 685–704.
- Hirdlicka A. Investigation of the Earth's crust by deep seismic sounding (DSS) on the territory of Czechoslovakia. — Studia geophys. et geodes., 1967, 11, N 3, 348–351.
- Hirn A., Kind R., Fuchs K. The structure of the upper mantle derived from a 1000 km long seismic-refraction profile in France. — Repts 13 General Assembly of ESC. Roumanie, September 1972.
- Hirn A., Steinmetz L., King R., Fuchs K. Long range profiles in Western Europe II. Fine structure of lower lithosphere in France (southern Bretagne). — Z. Geophys., 1973, 39, N 3.
- Hisamoto S. On anomaly of travel-time of S-waves observed in Eastern Japan (Pt 1). — J. Seismol. Soc. Japan, 1965, 18, N 3, 142–153.
- Hisamoto S. On anomaly of travel-time of S-waves observed in Eastern Japan (Pt. 2). — J. Seismol. Soc. Japan, 1965, 18, N 4, 195–203.
- Hoang T.P., Hirn A. Structure du manteau supérieur d'après l'analyse des résidues des temps de propagation des ondes longitudinales. — C.r. Acad. sci., Paris, 1970, 270, N 6, B 427–B 430.
- Hobson G.D., Overton A., Clay D.N., Thatcher W. Crustal structure under Hudson Bay. — Canad. J. Earth Sci., 1967, 4, N 5, 929–947.
- Hoffman J.P., Berg J.W., Cook K.L. Discontinuities in the earth's upper mantle as indicated by reflected seismic energy. — Bull. Seismol. Soc. America., 1961, 51, N 1, 17–27.
- Honda H. The velocity of the P wave in the surface layer of the Earth crust. — Geophys. Mag., 1931, 4, N 1.
- Huestis S., Molnar P., Oliver J. Regional S<sub>n</sub> velocities and shear velocity in the upper mantle. — Bull. Seismol. Soc. America, 1973, 63, N 2, 469–475.
- Hunter J.A., Mereu R.F. The crust of the earth under Hudson Bay. — Canad. J. Earth Sci., 1967, 4, N 5, 949–960.
- Husebye E.S. Correction analysis of Jeffreys. Bullen travel-time tables. — Bull. Seismol. Soc. America, 1965, 55, N 6, 1023–1038.
- Husebye E.S., Kanestron R., Rud R. Vertical and lateral inhomogeneities in the Earth's deep mantle. — Commun Obs. Roy. Belg. Ser. géophys., 1971, N 101, 200–201.
- Husebye E.S., Kanestron R., Rud R. Observations of vertical and lateral P-velocity anomalies in the earth's mantle using the Fennoscandian continental array. — Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 1971, 25, N 1–3, 3–16.
- Ibrahim K., Nuttli O. Travel-time curve and upper mantle structure from long period S waves. — Bull. Seismol. Soc. America, 1967, 57, N 5.
- Ibrahim A.B.K., Nuttli O.W. Travel-time curves and upper mantle structure from long-period S-waves. — C. r. Union géodés. et géophys. internat., 1969, N 15, pt. 1, 140.
- Ichikawa M. P-arrival time anomaly in Northern Japan. — Geophys. Mag., 1969, 34, N 4. "Internal Constitution of the Earth". B. Cutenberg (Ed.). N.Y., 1951.
- International Unions of Geodesy and Geophysics and Geological Science. — ICSU Bull., 1972, N 27, 37.
- Iosif T. On the question of the existence of a layer of low velocity in the upper parts of the earth's mantle in Rumania. — Rev. Roumaine géol., géophys. et Geogr. Ser. géophys., 1965, 3, N 1, 13–27.
- Iosif T. Sur l'existence de certaines hétérogénéités dans la partie supérieure du manteau terrestre. — Rev. roumaine géol., géophys. et géogr. Sér. géophys., 1966, 10, N 1, 33–41.
- Iosif T., Iosif S. Date asupra structurii scoartei si mantalei terestre. — Studii si cercetari geol., geofiz., geogr. Ser. geofiz., 1973, 11, N 2, 203–219.
- Ishida M. Seismicity and travel-time anomaly in and around Japan. — Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ., 1970, 48, N 6 A.

- Ivanova Z.S., Kellis-Borok V.I., Levshin A.L., Neigauss M.G. Love waves and the structure of the upper mantle. — *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 1964, 9, N 1, 1-7.
- Iyer H.M., Healy J.H. Teleseismic residuals at the LASA-USGS extended array and their interpretation in terms of crust and upper-mantle structure. — *J. Geophys. Res.*, 1972, 77, N 8, 1503-1527.
- Iyer H.M., Pakiser L.C., Stuart D.J., Warren D.H. Project Early Rise: seismic probing of the upper mantle. — *J. Geophys. Res.*, 1969, 74, N 17, 4409-4441.
- Jacoub N.K., Scott J.H., McKown F.A. Computer ray tracing through complex geological models for ground motion studies. — *J. Geophys.*, 1970, 35, N 4.
- Jacques D. Propagation of P waves and Rayleigh waves in Melanesia: structural implications. — *J. Geophys. Res.*, 1971, 76, N 29, 7217-7240.
- James D.E. Andean crustal and upper mantle structure. — *J. Geophys. Res.*, 1971, 76, N 14, 3246-3271.
- James D.E., Smith T.J., Steinhard J.S. Crustal structure of the Middle Atlantic States. — *Trans. Amer. Geophys. Union*, 1967, 48, N 1, 198.
- James D.E., Steinhard J.S. Structure beneath the continents. A critical review of explosion studies 1960-1965 in the Earth beneath the continents. — *Geophys. Monogr.*, Amer. Geophys. Union, 10, p. 293-333, 1966.
- Japanese National Report for the UMP. — Nat. Committee for the UMP. Tokyo, 1967.
- Jeffreys H. *The Earth*. Cambridge, 1924 (1929, 1952; 1959).
- Jeffreys H. The revision of seismological tables. — *Monthly Notices Roy. Astron. Soc., Geophys. Suppl.*, 1931, 2, 329-348.
- Jeffreys H. Tables of transmission of the P and S waves of earthquakes. Gray-Milne Trust, 1932.
- Jeffreys H. On the ellipticity correction in seismology. *Monthly Notices Roy. Astron. Soc., Geophys. Suppl.*, 1935, 3, 271-274.
- Jeffreys H. The structure of the earth down to the 20° discontinuity. — *Monthly Notices Roy. Astron. Soc., Geophys. Suppl.*, 1936, 3, 401-422; 1937, 4, 13-39.
- Jeffreys H. The times of P, S and SKS and the velocities of P and S. *Monthly Notices Roy. Astron. Soc., Geophys. Suppl.*, 1939, 4, 498-533.
- Jeffreys H. The times of P up to 30°. I. (First paper). — *Monthly Notices Roy. Astron. Soc., Geophys. Suppl.*, 1952, 6, 348-364.
- Jeffreys H. The times of P in Japanese and European earthquakes. — *Monthly Notices Roy. Astron. Soc., Geophys. Suppl.*, 1954, 6, 557-565.
- Jeffreys H. On the interpretation of Pd. — *Geophys. J.*, 1958, 1, 191-197.
- Jeffreys H. The times of P up to 30°. II (Second paper). — *Geophys. J.*, 1958, 1, 154-161.
- Jeffreys H. Travel-times for Pacific explosions. — *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 1962, 7, N 2.
- Jeffreys H. Revision of travel-times. — *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 1966, 11, N 1-2, p. 5-12.
- Jeffreys H., Bullen K.E. Times of transmission of earthquake waves. — *Burr. Centr. Seismol. Internat.*, 1935, A 11, 1-102.
- Jeffreys H., Bullen K.E. *Seismological Tables*. Brit. Assoc. Advanc. Sci. London, Gray-Milne Trust., 1940.
- Jeffreys H., Shimshoni M. The times of pP, Ss, sP and pS. — *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 1964, 8, N 3.
- Jeffreys H., Shimshoni M. The use of amplitudes in improving velocity distribution for Europe. — *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 1966, 10, N 5, 515-524.
- Jensen H. Vor klodes dybe indre. — *Jordskaelvene som geofysikernes 'vaertkoj'*. — *Vor viden*, 1958, N 17, 529-537.
- Jobert N. Calcul de la dispersion des ondes de Love de grande période à la surface de la Terre. *C. r. Acad. sci., Paris*, 1960, 250, 3693.
- Jobert N. Recherche d'une méthode permettant de remonter de la dispersion des ondes de Love à la structure du manteau terrestre. — *Colloq. Internat. Centre Nat. Rech. Scient.*, 1962, N111, 33-43.
- Johnson L.R. Array measurements of P-velocities in the Upper mantle. — *J. Geophys. Res.*, 1967, 72, 6309-6325.
- Johnson L.R. Array measurements of P velocities in the lower mantle. — *Bull. Seismol. Soc. America*, 1969, 59, 973-1008.
- Johnson L. Measurement of velocities in the mantle with a large seismic array. — *C. r. Union géodés et géophys. internat.*, 1969, N 15, pt. 1, 78.
- Jordan J.N. Travel-times and amplitudes from the Salmon explosion. — *Trans. Amer. Geophys. Union*, 1965, 46, N 1.
- Jordan T.H., Anderson D.L. Earth structure from free oscillations and travel times. — *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 1973, 35, N 1-3, 362-365.

- Jordan J., Black R., Bates Ch. C. Patterns of maximum amplitudes of Pn and P waves over regional and oceanic areas. — Bull. Seismol. Soc. America, 1965, 55, N 4, 693–72.
- Jordan J.N., Nickey W.V., Helterbran W., Clark D.M. Travel times and amplitudes from the Salmon explosion. — J. Geophys. Res., 1966, 71, N 14, 3469–3482.
- Kaila K.L., Krishna V.G., Narain H. Upper mantle velocity structure in the Hindukush region from travel time studies of deep earthquakes using a new analytical method. — Bull. Seismol. Soc. America, 1969, 59, N 5, 1949–1967.
- Kaila K.L., Krishna V.G., Narain H. Upper mantle P-wave velocity structure in Japan region from travel-time studies of deep earthquakes using a new analytical method. — Bull. Seismol. Soc. America, 1971, 61, N 6.
- Kaila K.L., Narain H., Reddy P.R., Krishna V.G. Body wave studies and the structure of the Earth's crust and upper mantle. — Bull. NGRI, September, December, 1970, 8, N 3, 4.
- Kaila K.L., Reddy P.R., Narain H. P-wave travel times from shallow earthquakes recorded in India and inferred upper mantle structure. — Bull. Seismol. Soc. America, 1968, 58, N 6, 1879–897.
- Kaminuma K. The crust and upper mantle structure in Japan. Pt. I. Phase velocities of love and Rayleigh waves in Central Japan. — Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo, Univ. 1966, 44, N 2, 481–494.
- Kaminuma K. The crust and upper mantle structure in Japan. Pt 3. An anisotropic model of the structure in Japan. — Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo, Univ. 1966, 44, N 2, 511–518.
- Kaminuma K., Aki K. Crustal structure in Japan from the phase velocity of Rayleigh waves. Pt 2. Rayleigh waves from Aleutian shock of March 9, 1957. — Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ., 1963, 41, N 1.
- Kanamori H. Study of the crust and mantle structure in Japan. — Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ., 1963, 41, N 4.
- Kanamori H. Upper mantle structure from apparent velocities of P-wave recorded at Wakayama Micro-Earthquake Observatory. — Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ., 1967, 45, 657–678.
- Kanamori H. Attenuation of P-waves in the upper and lower mantle. — Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ., 1967, 45, N 2.
- Kanamori H. Travel times to Japanese stations from Longshot and their geophysical implications. — Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ., 1968, 46, N 4.
- Kanamori H. Mantle beneath the Japanese arc. — Phys. Earth and Planet. Inter., 1970, 3, 475–483.
- Kanamori H. Seismological evidence for heterogeneity of the mantle. — J. geomagn. geoelec., 1970, 22, № 1–2, 53–70.
- Kanamori H. Velocity and Q of mantle waves. — Phys. Earth. Planet. Inter., 1970, 2, N 4.
- Kanamori H., Abe K. Deep structure of the Japan Arc as revealed by surface waves. — Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ., 1968, 46.
- Kanamori H., Press F. How thick is the lithosphere. — Nature, 1970, 226, N 5243, 330–331.
- Kanestrom R. Upper mantle structure of Northern Europe from apparent velocities of P-waves. — Geophysica, 1971, 11, N 2.
- Karnik V. Magnituden Bestimmung europäischer Nahbeben. — Tran. Inst. Geophys. Acad. Tchechoslov., 1956, 47.
- Katz S. Seismic study of crustal structure in Pennsylvania and New York. — Techn. Rept. Columbia Univ. Lamont Geol. Obs., 1953, N 32.
- Kebeasy R.M. On the anomaly of travel time of P waves observed at Japanese stations. Pt 1. — Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ., 1969, 47, N 3.
- Kebeasy R.M. P-wave travel time anomaly in the north and the East Circum Pacific region. — Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ., 1970, 48, N 3.
- Kebeasy R.M. P-wave travel time anomaly in Asia and the South Western Pacific. — Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ., 1970, 48, N 5.
- Keen C., Barrett D. A measurement of seismic anisotropy in the Northeast Pacific. — Canad. J. Earth Sci., 1971, 8, N 9.
- Keen C., Tramontini C. A seismic refraction survey on the Mid-Atlantic Ridge. — Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 1970, 20, N 5, 473–491.
- Kellis-Borok V.I. The inverse problem of seismology. — Mantle and Core in Planetary Physics. L. Corso, N.Y., Acad. Press Inc., 1971.
- Kellis-Borok V.I., Knopoff L.A. The progress report of the working group to the VI International Symposium of the Geophysical Theory and Computers. Copenhagen, 1969.
- Keilis-Borok V.I., Knopoff L. Inversion of arbitrary complex of seismological data (in press).
- Keilis-Borok V.I., Neigauz M.G., Shkadinskaya G.V. Application of the theory of eigenfunctions to the calculation of surface wave velocities. — Revs. Geophys., 1965, 3, N 1.

- Kellis-Borok V.I., Yanovskaya T. Inverse problem of seismology (structure review). Proc. III. Internat. Sympos. on Geophys. Theory and Computers. - Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 1967, 233, 13.
- Kishimoto Y. Seismometric investigation of the earth's interior. - Mem. Coll. Sci. Univ. Kyoto, 1956, A 28, 117-142.
- Kishimoto Y. Seismometric investigation on the Earth's interior. Pt IV. On the structure of the Earth's mantle. - Mem. Coll. Sci. Univ. Kyoto, 1958, A 28, N 4.
- Kishimoto Y., Hashizuma M., Oike K., Mino K. Some properties of microearthquakes in the western part of Kinki district (preliminaries). - Spec. Contribs Geophys. Inst. Kyoto Univ., 1964, N 4, 51-62.
- Kishimoto Y., Kamitsuki A. On the amplitude of seismic waves observed at the epicentral distance from 6° to 26°. - J. Seismol. Soc. Japan, 1957, 9, N 4, 209-217.
- Kizawa T. On surface waves propagated through the Pacific bottom and the continent. - Geophys. Mag., 1958, 28, N 3, 261-272.
- Klussman. Über das Innere der Erde. - Beitr. Geophys., 1915, 14, N 1.
- Knopoff L. The energy rate-depth function for earthquakes. - Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1964, 51, 1-3.
- Knopoff L.A. A matrix method for elastic wave problems. - Bull. Seismol. Soc. America, 1964<sub>1</sub>, 54, 431-438.
- Knopoff L. The upper mantle of the earth. - Science, 1969, 163, N 3873, 1277-1287.
- Knopoff L. Structure of the low-velocity channel and its relationship to large-scale tectonics. - Tectonophysics, 1969<sub>1</sub>, 7, N 5-6.
- Knopoff L. Observation and inversion of the surface-wave dispersion. - Tectonophysics, 1970, 10, N 1-3, 321-334.
- Knopoff L., McDonald G.F. Attenuation of small amplitude stress waves in solids. - Rev. Mod. Phys., 1952, 30, N 4.
- Knopoff L., Mueller S., Pilant W.L. Structure of the crust and upper mantle in the Alps from the phase velocity of Rayleigh waves. - Geol. Soc. America Spec. Papers., 1966, N 87, 335.
- Knopoff L., Press F. A proposal for the study of the crustal and upper mantle structure of the western Mediterranean by surface wave dispersion - Rapp. et proc. - verb. réun. Commiss. internat. explorat. scient. mer Méditerran., 1961, 16, N 3, 711-715.
- Knopoff L., Schlue J.W., Schwab F.A. Phase velocities of Rayleigh waves across the east Pacific Rise. - Tectonophysics, 1970, 10, N 1-3, 321-334.
- Knopoff L., Schwab F.A. Variation in the structure of the upper mantle under the Gulf of California and adjoining areas. - C. r. Union géodes. et géophys. internat., 1969, N 15, pt. 1, 211.
- Knopoff L., Schwab F.A., Schlue J.W. Dispersion de ondes Rayleigh al sur del golfo de California. - Geofis. int., 1969, 9, N 1-3, 39-52.
- Knopoff L., Teng T.L. Analytical calculation of the seismic travel-time problem. - Rev. Geophys., 1965, 3, N 1.
- Knott C.G. The propagation of earthquake waves through the earth and connected problems. - Proc. Roy. Soc. Edinburgh, 1919, 11, 39, 157-208.
- Kosminskaya I.P., Ryznichenko Y.V. Seismic studies of the Earth's crust in Eurasia. - Res. Geophys. Cambridge, M.I. T. Press, 1964.
- Kosminskaya I.P., Zverev S.M. Abilities of explosion seismology in oceanic and continental crust and mantle studies. - Canad. J. Earth Sci., 1968, 5, N 4, pt 2, 1091-1100.
- Kovach R. Surface wave dispersion for an Asia-African and a Eurasian path. - J. Geophys. Res., 1959, 64, 805-813.
- Kovach R.L. Seismic surface waves: some observations and recent development. - Phys. Chem. Earth, 1965, 6, 251-314.
- Kovach R.L., Anderson D.L. Long-period Love waves in a heterogeneous spherical earth. - J. Geophys. Res., 1962, 67.
- Kovach R.L., Anderson D.L. Higher mode surface waves and their bearing on the structure of the earth's mantle. - Bull. Seismol. Soc. America, 1964, 54, N 1, 161-182.
- Kovach R., Anderson D.L. Attenuation of shear waves in the upper and lower mantle. - Bull. Seismol. Soc. America, 1964<sub>1</sub>, 54.
- Kovach R., Press F. Rayleigh wave dispersion and crustal structure in the Eastern Pacific and Indian oceans. - Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 1961, 4, 202-216.
- Kovach R.L., Robinson R. Upper mantle structure in the Basin and Range province, western North America from the apparent velocities of S waves. - Bull. Seismol. Soc. America, 1969, 59, N 4, 1653-1665.
- Kuo J., Brune J., Major M. Rayleigh wave dispersion in the Pacific ocean for the period range 20 to 140 seconds. - Bull. Seismol. Soc. America, 1962, 52, 333-357.
- Kurita T. Crustal and upper mantle structure in Japan from amplitude and phase spectra of long-period P-waves; pt. 2. Kanto plain. - Spec. Contribs. Geophys. Inst. Kyoto Univ., 1969, N 9, 138-166.

- Labrousse H.Y. Rapport préliminaire sur les grands profils sismiques en France. — Труды X Генеральной ассамблеи ЕСК, т. I, М., 1968.
- Landisman M., Sato Y. Shear-wave velocities in the upper mantle. Abstr. — Trans. Amer. Geophys. Union, 1958, 39, 522.
- Landisman M., Sato Y., Ewing M. Surface waves in elastic media having gradients in their physical properties (Abstr.). — J. Geophys. Res., 1959, 64, 1113.
- Laska W. Über die Verwendung der Erdbeben-Commiss. Kaiserl. Akad. Wiss. Wien, 1904, N 33.
- Laska W. Ziele und Resultate der modernen Erdforschungen. IV. Die Erdinnere Munster. i. Wien, 1904<sub>1</sub>.
- Lee A.W. The travel-times of the seismic waves P and S. — Met. Office Geophys. Mem., 1938, 9, N 76.
- Lee W.H.K., Taylor P.T. Global analysis of seismic refraction measurements. — Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 1966, 11, 389-413.
- Leenhardt O. Etats des recherches sismiques sousmarines. II. Etude de l'Atlantique ouest part la méthode de refraction. — Rev. géogr. phys. et géol. dynam., 1957 (1958), 1, N 4, 252-262.
- Lees G.M. The evolution of a shrinking earth. — Quart. J. Geol. Soc. London, 1953, 109, 217-257.
- Lehmann I. Transmission times for seismic waves for epicentral distances around 20°. — Medd. Geod. Inst. Kbenhavn, 1934, N 5.
- Lehmann I. P and S at distances smaller than 25°. — Trans. Amer. Geophys. Union, 1953, 34, N 2, 477-483.
- Lehmann I. The times of P and S in North-Eastern America. — Ann. Geofis., 1955, 8, N 4, 351.
- Lehmann I. The velocity of P and S waves in the upper part of the earth's mantle. — Publ. Bur. Centr. Seismol. Internat., 1956, A, N 19, 115-123.
- Lehmann I. On the velocity distribution in the earth's upper mantle (Astr.). Freiburger Forschungsh., 1958, B 10, 403.
- Lehmann I. On phases in earthquake records at epicentral distances of 105 to 115°. — Contribs. Geophys., London-N.Y.-Paris-Los Angeles Pergamon Press, 1958<sub>1</sub>, 121-134.
- Lehmann I. Velocities of longitudinal waves in the upper part of the Earth's mantle. — Ann. geophys., 1959, 15, N 1, 93-118.
- Lehmann I. The interior of Earth as revealed by earthquakes. — Endeavour, 1959<sub>1</sub>, 18, N 70.
- Lehmann I. Structure of the upper mantle as derived from the travel-times of seismic P and S waves. — Nature, 1960, 186, N 4729, 956.
- Lehmann I. S-waves and structure of upper mantle. — Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 1961, 4, 124-138.
- Lehmann I. The travel-times of the longitudinal waves of the Logan and Blanca atomic explosions and their velocities in the upper mantle. — Bull. Seismol. Soc. America, 1962, 52, N 3.
- Lehmann I. Recent studies of body waves in the mantle of the earth. — Quart. J. Roy. Astron. Soc., 1962<sub>1</sub>, 3, N 4, 288-298.
- Lehmann I. On the travel times of P as determined from nuclear explosions. — Bull. Seismol. Soc. America, 1964, 54, N 1, 123-139.
- Lehmann I. On the structure of the Upper Mantle. — Bull. Seismol. Soc. America, 1966, 56, N 5, 1147-1152.
- Lehmann I. Discontinuous velocity changes in the mantle as derived from seismic travel times and amplitudes. — C. r. Union géodés. et géophys. internat., 1969, N 15, pt. 1, 166.
- Lehmann I. The 400-km discontinuity—Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 1970, 21, N 3-4, 359-372.
- Lewis B., Meyer R.P. Analysis of 1962 and 1965 North Carolina cooperative experiments. — Abstr. Earthquake Notes Seismol. Soc. America, 1966 (1965), 36, N 3-4, 29.
- Lewis B., Meyer R.P. Results of the Early Rise seismic experiment from Lake Superior westward (Abstr.). — Trans. Amer. Geophys. Union, 1967, 48, N 1, 196.
- Lewis B.T.R., Meyer R.P. A seismic investigation of the upper mantle to the West of Lake Superior. — Bull. Seismol. Soc. America, 1968, 58, N 2.
- Ludwig W., Ewing J.I., Ewing M. Structure of the Argentine continental margin. — Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geologists, 1968, 52, N 12, 2337-2368.
- Ludwig W.J., Nafe J.E., Simpson E.S.W., Sacks S. Seismic refraction measurements on the Southeast African Continental Margin, — J. Geophys. Res., 1968, 73, N 12.
- Lynch J.J. The development of seismology from biblical times to 1970. — Ann. N.Y. Acad. Sci., 1971, 184, 80-85.
- McCamy K., Meyer R.P. A correlation method of apparent velocity measurement. — J. Geophys. Res., 1964, 69, 691-699.
- McConnell R., Gupta R.N., Wilson J.T. Compilation of deep crustal structure seismic refraction profiles. — Rev. Geophys., 1966, 4, N 1, 41-100.

- McCConnell R.V., Taggart-Cowan J.N. Crustal seismic refraction profiles. A compilation. Univ. Toronto. Inst. Earth Sci., Scient. Rep., 1964, N 8.
- MacDonald G.J.F., Ness N.F. A study of the free oscillations of the Earth. - Techn. Rept NASA, 1962, NR-136, 46 p.
- Macelwane J.B. A study of the relation between the periods of elastic waves and the distance traveled by them, based upon the seismographic records of the California earthquake, January 31 1922. - Bull. Seismol. Soc. America, 1923, 13, N 2, 13-69.
- Macelwane J.B. Our present knowledge concerning the interior of the Earth. - Bull. Seismol. Soc. America, 1931, 21, N 4, p. 243-250.
- Macelwane J.B. Roots of mountains or roots of continents? - Bull. Seismol. Soc. America, 1937, 27, N 1, p. 29-34.
- McEvelly T.V. Central U.S. crust-upper mantle structure from Love and Rayleigh wave phase velocity inversion. - Bull. Seismol. Soc. America, 1964, 54, 1997-2015.
- McGetchin T.R., Silver L.T. A crustal - upper mantle model for the Colorado plateau based on observations of crystalline rock fragments in the Moses Rock dike. - J. Geophys. Res., 1972, 77, N 35.
- Magnitsky V.A., Khorosheva V.V. The waveguide in the mantle of the earth and its probable physical nature. - Ann. geois., 1961, 14, N 1, 87-94.
- Makris J., Menzel H., Zimmermann J., Bonjer K.P., Fuchs K., Wohlenberg J. Crustal and upper mantle structure of the Ethiopian Rift derived from seismic and gravity data. - Z. Geophys., 1970, 36, 387-391.
- Makris J., Menzel H., Zimmermann J., Bonjer K.P., Fuchs K., Wohlenberg J. Crustal and upper mantle structure of the Ethiopian rift derived from seismic and gravity data. - Z. Geophys., 1970, 36, N 3, 387-391.
- Marshall W.H. The interior of the Earth. - Sci. News, 1958, N 47, 46-64.
- Massé R.P. Shear velocity distribution beneath the Canadian shield. - J. Geophys. Res., 1973, 78, N 29, 6943-6950.
- Massé R.P., Landisman M., Jenkins J. An investigation of the upper mantle compressional velocity distribution beneath the Basin and Range Province. - Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 1972, 30, N 1, 19-36.
- Matveeva N.N. The nature of boundaries within the upper mantle as derived from seismological data. - Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 1967, 13, N 1-3, 235-240.
- Mayer-Rosa D. Die Geschwindigkeitsverteilung seismischer Wellen im oberen Erdmantel Europas. - Diss. Dokt. Naturwiss. Univ. Stuttgart, 1969, 79 S.
- Mayer-Rosa D., Müller St. Velocity and density distributions in the upper mantle of Europe. - Commun. Obs. Roy. Belg., série géophys., 1971, N 101, 171-172.
- Mayer-Rosa D., Mueller St. The gross velocity-depth distribution of P and S-waves in the upper mantle of Europe from earthquake observations. - Z. Geophys., 1973, 39, N 3.
- Mechler P., Mseddi R., Plantet J.L. Seismologie-Carte generale du bas de asthenosphere sous la France. - C.r. Acad. sci. Paris, 1971, 273.
- Mechler P., Rocard Y. Description d'un relief remarquable présenté sous les Vosges par une couche de discontinuité de vitesse sismique vers 600 km de profondeur. - C.r. Acad. sci., Paris, 1971, D272, N 25, 3120-3121.
- Mei I. The amplitude ratio PP/P as recorded by Golitzin Seismograph. - Bull. Seismol. Soc. America, 1943, 33, 149-196.
- Meissner R. Zum Aufbau der Erdkruste. Ergebnisse der Weitwinkelmessungen im bayerischen Molassebecken. Teil 1. - Gerlands Beitr. Geophys., 1967., 76, N 3, 211-254.
- Mereu R.F. Curvature corrections to upper mantle seismic refraction surveys. - Earth and Planet. Sci. Letters, 1968, 3, N 5, 469-475.
- Mereu R.F. The structure of the crust and the upper mantle under the Canadian shield. C.r. Union géodes. et géophys. internat., 1969, N 15, pt. 1, 149.
- Mereu R.F. Effect of Mohorovičić topography on the amplitudes of seismic P-waves. - J. Geophys. Res., 1969, 74, N 17.
- Mereu R.F., Hunter I.A. Crustal and upper mantle structure under the Canadian shield from Project Early Rise data. - Bull. Seismol. Soc. America, 1969, 59, N 1.
- Mesko A. Velocities of P and S waves at depths between 50 and 600 km. - Acta geod., geophys. et montanistica., 1971, 6, N 1-2.
- Miki H. Is the layer C (413-1000 km) inhomogeneous? - J. Phys. Earth, 1955, 3, N 1.
- Miki H. On the earth's mantle. - Mem. Coll. Sci. Kyoto Univ., 1956, A27, N 4, 363-403.
- Mikumo T., Otsuka M., Utsu T., Terashima T., Okada A. Crustal structure in Central Japan. pt. 2. - Bull. Earthq. Rws. Inst. Tokyo., Univ., 1961, 39, N 6.

- Miln A. R. Two seismic refraction measurements: north Pacific Ocean basin and Dixon Entrance. — *Bull. Seismol. Soc. America*, 1964, 54, N 1, 41–50.
- Miln J. Seismometry and Geite. — *Nature*, 1903, 67, p. 538–539.
- Mintrop L. On the stratification of the earth's crust according to seismic studies of a large explosion and of earthquakes. — *Geophysiks*, 1949, XIV, N 3, p. 321–336.
- Mitronovas W., Isaacs B. L. Seismic velocity anomalies in the upper mantle beneath the Tonga-Kermadec Island arc. — *J. Geophys. Res.*, 1971, 76, N 29, 7154–7180.
- Mitronovas W., Isaacs B., Seeber L. Earthquake locations and seismic wave propagation on the upper 250 km of the Tonga island arc. — *Bull. Seismol. Soc. America*, 1969, 59, N 3.
- Mizoue M. Variation of earthquake energy release with depth. Pt. 1. — *Bull. Earthq. Res. Inst, Tokyo Univ.*, 1967, 45, N 3.
- Mizutani H., Abe K. An earth model consistent with free oscillation and surface wave data. — *Phys. Earth and Planet. Inter.*, 1972, 5, 345–356.
- Moazami-Goudarzi K. Vitesse de phase des ondes de Rayleigh et structure de la croûte et du manteau supérieur entre Limousin et Morvan. — *C.r. Acad. sci., Paris.*, 1967, 264, N 23, B1618–1621.
- Moazami-Goudarzi K. La dispersion des ondes de Rayleigh et les structures de la croûte et du manteau supérieur entre Limousin et Morvan. Paris, 1968.
- Moazami-Goudarzi K. Study of the dispersion of the Rayleigh waves in France. — *C.r. Union géodes. et géophys. internat.*, 1969, N 15, pt. 1, 179.
- Mohammadioun B. Structure du manteau terrestre d'après les spectres d'énergie des ondes de volume longitudinales. — *Papers 9th Assembly Europ. Seismol. Commis. Copenhagen*, 1966; *Ann. Geophys.*, 1967, 23, N 1.
- Mohorovičić A. Das Erdbeben vom 8.X.1909. — *Jahrb. Meteorol. Obs. Zagreb*, 1910, IV Tell, Absch. 1.
- Mohorovičić A. Hodografi longitudinalnih i transversalnih valova potresa. *Rad. Jugoslav. Akad.*, 1922, 226, 94–190.
- Mohorovičić S. Die reduzierte Laufzeitkurve und die Abhängigkeit der Herdtiefe eines Beben von der Entfernung des Inflexionspunktes der primären Laufzeitkurve. II. Mitteilung: Die Ausbreitung der Erdbebenstrahlen in der tiefen Schichten der Erde. — *Gerlands Beitr. Geophys.*, 1915–1918, XIV, 187–198.
- Molnar P., Oliver J. Lateral variations of attenuation in the upper mantle and discontinuities in the lithosphere. — *J. Geophys. Res.*, 1969, 74, N 10, 2648–2682.
- Moltshan J.M., Pisarenko V. F., Smirnova N. A. Some statistical methods of detection of signal in the presence of noise. — *Geophys. J.*, 1964, 8 (3).
- Mooney H. M. Upper mantle inhomogeneity beneath New Zealand. — *Seismic evidence.* — *J. Geophys. Res.*, 1970, 75, N 2, 285–309.
- Mooney H. M., Bolt B. A. Dispersive characteristics of the first three Tayleigh modes for a single surface layer. — *Bull. Seismol. Soc. America*, 1966, 56, 379–389.
- Morelli C. Stato attuale delle conoscenze sulle structure geologiche profonde. — *Scientia*, 1953, 88, N 3, 69–72.
- Morelli C. Experimental seismology in the Alps (1957–1967). — *Preliminary Report*, 1968.
- Morris G. B., Raitt R. W., Shor G. G. Jr. Velocity anisotropy and delay-time maps of the mantle near Hawaii. — *J. Geophys. Res.*, 1969, 74, N 17, 4300–4316.
- Mueller St. Low-velocity layers within the Earth's crust and mantle. — *Abstr. Papers ESC Assembly Leningrad* 1968, M., 1968.
- Mueller St. Structure of the crust and upper mantle in the eastern part of France. — *C.r. Union géod. et géophys. internat.*, 1969, N 15, pt. 1, 183–184.
- Mueller G., Ansorge J., Mayer-Rosa D., Fuchs K. Evidence for several velocity reversals in the upper mantle. — *Z. Geophys.*, 1968, 34.
- Müller G., Fuchs K. A comparison of theoretical and observed seismograms for models of the crust and the upper mantle. — *Communs Obs. Roy. Belg. sér. géophys.*, 1971, N 101, 184.
- Müller G., Mayer-Rosa D. Theoretical seismograms for models of the upper mantle in Europe. — *Communs Obs. Roy. Belg., sér. géophys.*, 1971, N 101, 64–70.
- Murauchi S., Den N., Asano S., Hotta H., Yoshii T., Asanuma T., Hagiwara K., Ichikawa K., Sato T., Ludwig W. J., Ewing J. I., Edgar N. T., Houtz R. E. Crustal structure of the Philippine Sea. — *J. Geophys. Res.*, 1968, 73, N 10, 3143–3171.

- Nafe J., Brune J. Observation of phase velocity for Rayleigh waves in the periods range 100 to 4000 sec. — Bull. Seismol. Soc. America, 1960, 50, N 3.
- Nagamune T. On the travel-time and the dispersion of surface waves. — Geophys. Mag., 1956, 27, N 1, 93-104.
- Negi J. G., Upadnyay S. K., Singh R. M., Raval U., Gard S. C., Varma S. K., Jheoretical heophysics: research under Upper Mantle Project. — Bull. Nat. Geophys. Res. Inst., 1970, 8, N 3-4, 113-124.
- Neprochnov Yu. P., Kosminskaya I. P., Malovitsky Ya. P. Structure of the crust and upper mantle of the Black and Caspian Seas. — Tectonophysics, 1970, 10, N 5-6, 517-538.
- Ness N. F., Harrison J. C., Slichter L. B. Observations of the free oscillations of the earth. — J. Geophys. Res., 1961, 66, N 2, 621-629.
- Neumann F. The transmission of seismic waves. — Trans. Amer. Geophys. Union, 1933, 14, 329-335.
- Niazim, Anderson L. D., Upper mantle structure of Western North America from apparent velocities of P-waves. — J. Geophys. Res., 1965, 70, N 18, 4633-4640.
- Nishimura E., Kishimoto Y. On the local structural character of the earth's crust. — Tellus, 1956, 8, N 3, 329-334.
- Nishimura E., Kishimoto I., Kamitsuki A. On the nature of the 20° discontinuity in the Earth's mantle. — Tellus, 1958, 10, 137-144.
- Nojonen I. Use of particle motion in detecting and indentifying crustal phases from near events. — J. Phys. Earth, 1968, 16, N 2, 79-85.
- Nojonen I. Comparison of shear wave velocities in the crust and upper mantle between the shield and island arc structures. — Commun. Obs. Roy. Belg. sér. géophys., 1971, N 101, 63.
- Nojonen I., Porkka M. T., Pirhonen S., Luosto U. The crust and mantle in Finland. — Papers 9th Assembly Europ. Seismol. Commiss., Copenhagen, 1966, 193-201.
- Nojonen I., Porkka M. T., Pirhonen S., Luosto U. The crust and mantle in Finland. — J. Phys., 1969, 15, 19-24.
- Nur A. Viscous phase in rocks and the low-velocity zone. — J. Geophys. Res., 1971, 76, N 5, 1270-1277.
- Nuttli O. Seismological evidence pertaining to the structure of the Earth upper mantle. — Rev. Geophys., 1963, 1.
- Nuttli O., Bolt B. A. P-wave residuals as a function of azimuth. 2. Undulations of the mantle low-velocity as an explanation. — J. Geophys. Res., 1969, 74, N 27, 6594-6602.
- O'Brien P. N. S. Analysis of a small number of seismic records along an E-W Alpine profile. — Bull. geophysica teorica ed applicata, 1967, IX, N 33.
- Officer C. R., Ewing J. I., Edwards E. S., Johnson H. R. Geophysical investigations on the Eastern Caribbean. Venezuelan basin, Antilles island arc and Puerto Rico trench. — Bull. Geol. Soc. America, 1957, 68, N 3, 359-378.
- Oldham R. D. The constitution of the interior of the Earth as revealed by earthquakes. — Quart. J. Geol. Soc. London, 1906, 62, 456-473.
- Oldham R. D. Radium and the evolution of the Earth's crust. — Nature, 1913, 91, N 2286, p. 635.
- Oldham R. D. The interior of the earth. — Geol. Mag., 1919, 6.
- Oliver J. Seismology and the IGY. — Geophys. and IGY. (Proc. Symposium Wash. 28-29th June 1957), — Washington, D.C. Amer. Geophys. Union, 1958, 190-197.
- Oliver J. A summary of observed seismic surface wave dispersion. — Bull. Seismol. Soc. America, 1962, 52, 81-86.
- Oliver J. Propagation of PL waves across the United States. — Bull. Seismol. Soc. America, 1964, 54, N 1, 151-160.
- Oliver J., Dorman J. Exploration of sub-oceanic structure by the use of seismic surface wave in the sea. 3. M.N. Hill. (Ed.), London, 1963, p. 110-133.
- Oliver J., Dorman J., Sutton G. The second shear mode of continental Rayleigh waves. — Bull. Seismol. Soc. America, 1959, 49, 379-389.
- Oliver J., Ewing M. Higher modes of continental Rayleigh waves. — Bull. Seismol. Soc. America, 1957, 48.
- Oliver J., Ewing M. Normal modes of continental surface waves. — Bull. Seismol. Soc. America, 1958, 48, N 1, 33-49.
- Oliver J., Isaacks B. Deep earthquake zones anomalous structures in the upper mantle and the lithosphere. — J. Geophys. Res., 1967, 72, N 16, 4259-4275.

- Oliver J., Isaacs B. L. Some evidence in the structure of the mantle near an island arc. (Abstr.) — Trans. Amer. Geophys. Union, 1967, 48, N 1, 219.
- Oliver J., Isaacs B. Structure and mobility of the crust and mantle in the vicinity of island arcs. — Canad. J. Earth Sci., 1968, 5, N 4, pt 2, 985–991.
- Oliver J., Isaacs B. Deep earthquake zone: an anomalous part of the upper mantle. — C.r. Union géodés. et géophys. internat., 1969, N 15, pt. 1, 144.
- Oliver J., Kovach R., Dorman J. Crustal structure of the New York — Pennsylvania Area. — J. Geophys. Res., 1961, 66, 215–225.
- Otsuka M. Velocity anomalies of seismic waves measured on the central California network. — Trans. Amer. Geophys. Union, 1965, 46, N 1, 152.
- Otsuka M. Azimuth and slowness anomalies of seismic waves measured on the central California seismographic array. Observations. — Bull. Seismol. Soc. America, 1966, 56, 223–239.
- Overton A. Crustal seismic measurements over the Appalachian front from shots in Labrador and Quebec. — Canad. J. Earth Sci., 1972, 9, N 10, 1297–1304.
- Pakisier L. C. Structure of the crust and Upper Mantle in the western United States. — J. Geophys. Res., 1963, 68, N 20.
- Pakisier L. C. U.S. Transcontinental geophysical survey: a contribution to the Upper Mantle Project (Abstr.) — Tectonophysics, 1969, 7, N 5–6, 599.
- Pakisier L. C., Steinhart J. S. Explosion seismology in the Western Hemisphere in research in geophysics. 2. Solid Earth and Interference Phenomena, chapt, 5. H. Odishaw (Ed.). Cambridge, MIT Press, 1964, p. 123–147.
- Pakisier L. C., Zietz I. Transcontinental crustal and upper mantle structure. — Rev. Geophys., 1965, 3 (4), 505–520.
- Papazachos B. Incidence angles and amplitude ratio of P- and PP-waves. — Bull. Seismol. Soc. America, 1949, 39, 269–284.
- Papazachos B. C. Phase velocities of Rayleigh waves in Southeastern Europe and Eastern Mediterranean Sea. — Pure and Appl. Geophys., 1969, 75, N 4, 47–55.
- Papazachos B. C., Zaylanos M., Vasiliou A. Dispersion of surface waves in the region of Greece. — C.r. Union géodés. et géophys. internat., 1969, N 15, pt. 1, 178–179.
- Papke K. H. Die Mohorovičić-Discontinuität. — Geologie, 1967, 16, Beih. 57, 127 S.
- Payo G. Crustal structure of the Mediterranean sea, Part 2. Phase velocity and travel times. — Bull. Seismol. Soc. America, 1969, 59, N 1.
- Payo G. Structure of the crust and upper mantle in the Iberian shield by means of a long period triangular array. — Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 1970, 20, N 5, 493–508.
- Payo G. Crust-mantle velocities in the Iberian peninsula and tectonic implications of the seismicity in this area. — Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 1972, 30, N 1, 85–99.
- Pekeris C. L. Terrestrial spectroscopy. — Nuovo cimento, suppl., 1965, 3, N 4, 864–886.
- Pekeris C. L. The internal constitution of the Earth. — Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1966, 11, N 1–2, 85–132.
- Péronaci F. Il terremoto di Jenice del 18. III. 1953 e le caratteristiche sismiche dell'Anatolia. — Ann. geofis., 1957, 10, N 1–2, 97–103.
- Petrashen G. J. The work of the Leningrad School on Siesmic wave propagation. — Rev. Geophys., 1965, 3, N 1.
- Phinney R. A. Theoretical calculation of the spectrum, phase velocity and decay of first arrivals in layered elastic system. — Geophys. J., 1966, 11, N 1–2.
- Pho H. T., Hirn A. Structure du meneau supérieur d'après l'analyse des résidues des temps de propagation des ondes longitudinales. C.r. Acad. sci., Paris, 1970, A270.
- Le Pichon X., Houtz R. E., Drake Ch. L., Nafe J. E. Crustal structure of the Mid-Ocean Ridge. I. Seismic refraction measurements. — J. Geophys. Res., 1965, 70, N 2.
- Piermattei R., Nowroozi A. Dispersion of Rayleigh waves for purely oceanic paths in the Pacific. — Bull. Seismol. Soc. America, 1969, 59, N 5.
- Pilaut W. L. Rayleigh wave phase and group velocities on the North American Continent (Abstr.) — Trans. Amer. Geophys. Union, 1967, 48, N 1, 207.
- Pomerantseva J. V., Moszhenko A. N., Egorkina G. V., Sokolova J. A. Principal results of crustal and upper mantle investigation with "Zemlia" recording units. — Papers 9th Assembly Europ. Seismol. Commiss. Copenhagen, 1966, København, 1967, 43–55.
- Porkka M. T. Surface wave dispersion for some Eurasian paths. I. Rayleigh waves from Kamchatka and Japan to Finland. — Geophys., 1960, 7, 101–106.

- Porkka M. T. Surface wave dispersion for some Eurasian paths. II. Love waves. — *Geophysica*, 1961, 7, 151–160.
- Porkka M. T. Surface wave studies on the crust and upper mantle in Eurasia. — *Papers 9th Assembly Europ. Seismol. Commiss.*, Copenhagen, 1966. København, 1967, 203–208.
- Porkka M. T., Korhonen H., Saviaro K. Study of P-wave velocity below Moho. — *Pure and Appl. Geophys.*, 1972, 97, N 5, 51–56.
- Press F. Determination of crustal structure from phase velocity of Rayleigh waves, Pt. I Southern California. — *Bull. Geol. Soc. America*, 1956, 67, N 12, pt I, 1647–1658.
- Press F. Determination of crustal structure from phase velocity of Rayleigh waves. Part II. San Francisco Bay Region. — *Bull. Seismol. Soc. America*, 1957, 47, 87–88.
- Press F. Some implications on mantle and crustal structure from G-waves and Love waves. — *J. Geophys. Res.*, 1959, 64, N 5, 565.
- Press F. Crustal structure in the California – Nevada Region. — *J. Geophys. Res.*, 1960, 65, 1039–1051.
- Press F. The earth's crust and upper mantle. — *Science*, 1961, 133, N 3463, 1455–1463.
- Press F. Crustal and upper mantle structure of the Pacific Ocean and adjacent continent. 10th Pacif. Ocean Congr. Pacif. Assoc., Honolulu, 1961, 363.
- Press F. Long-period waves and free oscillations of the Earth. *Research in Geophysics*. Cambridge, MIT Press, 1964.
- Press F. A plastic decoupling zone in the upper mantle. — *Perspectives Mod. Phys. H.Y.* London–Sydney. Interscience, 1966, p. 657–664.
- Press F. Earth model obtained by Monte-Carlo inversion. — *J. Geophys. Res.*, 1968, 73, N 16, 5223–5234.
- Press F. The best model after 1.000.000 random trials. — *Nuovo cimento*, suppl., 1968, 6, N 1, 152–153.
- Press F. Earth models consistent with geophysical data. — *Phys. Earth and Planet. Intern.*, 1970, 3, 3–22.
- Press F. Regionalized Earth models. — *J. Geophys. Res.*, 1970, 75, N 32, 6575–6581.
- Press F., Beihler S. Inference on crustal velocities and densities from P-wave delays and gravity anomalies. — *J. Geophys. Res.*, 1964, 69, N 14.
- Press F., Ben-Menachem A., Toksöz N. Experimental determination of fault length and rupture velocity. — *J. Geophys. Res.*, 1961, 66, N 10.
- Press F., Ewing M. Pn and Sn velocities at great distances. — *Bull. Seismol. Soc. America*, 1954, 65, N 1.
- Press F., Ewing M. Waves with Pn and Sn velocity at great distances. — *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 1955, 41, N 1, 24–27.
- Press F., Ewing M. A mechanism for G-wave propagation. Abstr. — *Trans. Amer. Geophys. Union*, 1956, 37, 355.
- Press F., Ewing M., Oliver J. Crustal structure and surface wave dispersion in Africa. — *Bull. Seismol. Soc. America*, 1956, 46, 97–103.
- Press F., Gutenberg B. Channel P waves IIg in the earth's crust. — *Trans. Amer. Geophys. Union*, 1956, 37, N 6, 754–756.
- Press F., Harkrider D. A fast, convenient program for computation of surface wave dispersion curves in multilayered media. — *Bull. Seismol. Soc. America*, 1961, 51, N 4, 495–502.
- Press F., Takeuchi H. Note on the variational and homogeneous layer approximations for the computation of Rayleigh wave dispersion. — *Bull. Seismol. Soc. America*, 1960, 50, N 1, 81–85.
- Phinney R. A. Theoretical calculation of the spectrum phase velocity and decay of first arrivals in layered elastic system. — *Geophys. J.*, 1966, 11, N 1–2.
- Raitt R. W. Seismic refraction studies of the Pacific Ocean basin. Pt I. Crustal thickness of the Central Equatorial Pacific. — *Bull. Geol. Soc. America*, 1956, 67, 1623–1640.
- Raitt R. W., Shor G. C. Jr. Pacific oceanic crust. — *Preprints. Internat. Oceanogr. Congr.*, 1959, Washington.
- Raitt R. W., Shor G. G., Jr., Francis T. J. G., Morris G. B. Anisotropy of the Pacific Upper Mantle. — *Scripps Inst. Oceanogr. Rept*, 1967, 67, N 8.
- Raitt R. W., Shor G. G., Jr., Francis T. J. G., Morris G. B. Anisotropy of the Pacific Upper Mantle. — *J. Geophys. Res.*, 1969, 74, N 12, 3095–3109.
- Raitt R. W., Shor G. G., Morris G. B., Kirk H. K. Mantle anisotropy in the Pacific Ocean. — *Tectonophysics*, 1971, 12, N 3, 173–186.
- Recq M. The Pn velocity under the gulf of Genoa. — *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 1973, 20, N 3, 447–450.
- Repetti W. C. S. J. New values for some of the discontinuities in the earth. *Dissertation* St. Louis Univ. 1928. Also, Manila, 1930.

- "Report of the Conference of experts to study the methods of detections of possible agreement on the suspension of nuclear tests". Exp/Nuc., 1958, 28, 26. (См. также Romney C.—J. Geophys. Res., 1959, 64, 1489).
- Report of the Committee on the geophysical and geological study of continents, 1952–1954. — Trans. Amer. Geophys. Union, 1955, 36, N 4, 695–708.
- Richards T. C. Measurement of the thickness of the Earth's crust on the Albertan Plains of Western Canada. — Nature, 1958, 182, N 4632, 384–385.
- Rikitake T. Electrical state and seismicity beneath Japan. — Bull. Earthq. Res. Inst. Tolyo Univ, 1956, 34, N 4, 291–300.
- Rikitake T., Miyamura S., Tsubokawa I., Murauchi S., Uyeda S., Kuno H., Gorai M. Geophysical and geological data in and around the Japan Arc. — Canad. J. Earth Sci., 1968, 5, N 4, part 2.
- Ritsema A. R. Amplitudes of bodily seismic waves. — Madjalah ilmu a alam untuk Indonesia.— Contrib- Dept Geol., N 22, 1956, 112, N 2, 135–152.
- Riznichenko Yu. V., Shamina O. G. Model study of the upper mantle shadow zone. — Tectonophysics, 1964, 1, 443–448.
- Robinson R., Kovach R.L. Shear wave velocities in the Earth's mantle. — Phys. Earth and Planet Interiors, 1972, 5, N 1, 30–44.
- Roche A. La reconnaissance de l'interieur du globe par les ondes séismiques. — Rev. ind. minéral, 1955, 36, N 631, 1134–1142.
- Roller J. C. New results on crustal thickness and upper mantle velocities from seismic-refraction measurements. — Abstr. Papers. — Trans. Amer. Geophys. Union, 1963, 44, N 4, 890.
- Roller J. C., Jackson W. H. Seismic wave propagation in the upper mantle: Lake Superior, Wisconsin to Central Arizona. — J. Geophys. Res., 1966, 71, N 24, 5933–5941.
- Roller J. C., Healy J. H., Jackson W.H.A. A seismic-refraction profile extending from Lake Superior, Wisconsin, to Agate, Colorado. — Trans. Amer. Geophys. Union, 1965, 46, N 1, 155.
- Romney C. Amplitudes of seismic body waves from underground nuclear explosions. — J. Geophys. Res., 1959, 64, N 10.
- Romney C., Brooks B.G., Mansfield R.H., Carder D.G., Jordan J.N., Gordon D.W. Travel-times and amplitudes of principal body phases recorded from Gnome. — Bull. Seismol. Soc. America, 1962, 52, N 5, 1057–1074.
- Rothé J.P. Seismology. — Ann. Internat. Geophys. Year, 1957, 4, N 4–7, 333–344.
- Röwer P., Stroback K. Variation der P-Geschwindigkeiten von Erdbebenwellen im Gebiet des Rheingravens. — Abhandl. Geol. Landesamt. Baden-Württemberg, 1967, N 6, 121–122.
- Ruttman A., Keen M.J. A time-term analysis of the first arrival data from the seismic experiment in Hudson Bay. 1965. — Canad. J. Earth Sci., 1967, 4, N 5, 901–928.
- Ruprechtová L. Mistní hodochrony vln PP and SS pro stanici Praha. — Práce Geophys. ústavu ČSAV, 1956, N 20–35, 121–134.
- Ruprechtová L. The 20° discontinuity and the travel-time curves of P and S for Praha in the range 10–30°. — Geophys. Sb., 1956. Praha, 1957, N 36–60, 523–542.
- Ruprechtová L. Dependence of amplitudes of seismic body waves on the distance. Studia Geophys. Geodet. Českosl. Akad., 1958, 4, 397–399.
- Ruprechtová L. Travel-time curves and amplitudes distance curves of the P and S waves at distances smaller than 30°. — Geofis. Sb., 1959(1960), p.99–125; 145–160.
- Ryall A. The Hebgen Lake, Montana, earthquake of August 18 1959; P-waves. — Bull. Seismol. Soc. America, 1962, 52, N 2, 235–271.
- Ryaboy V.Z. Structure of Earth's crust and upper mantle along deep seismic profile (Kopet-Dag to Aral Sea). — Internat. Geol. Rev., 1967, 9, N 3, 296–299.
- Ryall A., Bennett D.L. Crustal structure of southern Hawaii related to volcanic processes in the upper mantle. — J. Geophys. Res., 1968, 73, N 14, 4561–4582.
- Ryall A., Stuart D. Travel-times and amplitudes from nuclear explosion; Nevada Test Site to Ordway, Colorado. — J. Geophys. Res., 1963, 68, N 20.
- Rykunov L.N. The study of a decrease of P-waves amplitudes in the shadow zone of the earth's model. — Publ. Bur. Centr. séismol. internat., 1959A, N 2, 123–127.
- Saito M. Excitation of free oscillations and surface waves by a point source in a vertically heterogeneous earth. — J. Geophys. Res., 1967, 72, N 14.
- Saito M., Takeuchi H. Surface waves across the Pacific. — Bull. Seismol. Soc. America, 1966, 56, 1067–1091.
- Saito M., Takeuchi H., Kobayashi N. Dispersion characteristics of mantle waves and regional structure of the Earth. (Pt. I. Dispersion curves of surface waves for various earth models. — J. Seismol. Soc. Japan, 1965, 18, N 2, 94–102.

- Santo T.A. Dispersion of Love waves along various paths to Japan. — Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ., 1961, 39, pt 4.
- Santo T. A review of the investigations into Earth's crustal structure from the dispersion of seismic surface waves. Pr III. Upper Mantle Structure. — J. Geogr., 1963, 72, N 6, 13.
- Santo T. Some topics of special crust-mantle system suggested from the dispersion of surface waves. — J. Geogr., 1964, 73, N 3, 36–44.
- Santo T. Lateral variation of Rayleigh wave dispersion character. Pt 3. Atlantic Ocean, Africa, Indian Ocean. — Pure and Appl. Geophys., 1966, 63, N 1, 40–59.
- Sato Y. Attenuation, dispersion and the wave guide of the G wave. — Bull. Seismol. Soc. America, 1958, 48, N 3, 231–251.
- Sato Y. Attenuation of seismic waves. — J. Phys. Earth, 1967, 15, N 2.
- Savarensky E.F. Upper mantle investigation by observations of long-period seismic waves in Europe. — Gerlands Beitr. Geophys., 1970, 79, N 3, 164–166.
- Savarensky E.F., Shamina O.G. The low-velocity layer in the earth's mantle. — Труды X Генеральной ассамблеи ЕСК, 1968, т. I, М., "Наука", 1970.
- Seidl D., Mueller St. Upper mantle structure in Europe from the dispersion and attenuation of seismic surface waves. — Proc. 10 Assembly ESC, I. M., 1970.
- Seidl D., Mueller St., Caputo M., Panza G.P., Knopoff L. The structure of the crust and upper mantle under the Mediterranean basin from Rayleigh wave dispersion. — Rapport proc.—verb. commiss. internat. explor. sci. mer Mediterr. Monaco, 1973, 21, N 11.
- Seidl D., Muller St., Knopoff L. Dispersion von Rayleigh-Wellen in Südwest Deutschland und in den Alpen. — Z. Geophys., 1966, 32, Sonderheft, 427–481.
- Seidl D., Mueller St., Reichenbach H. Dispersion and absorption of seismic surface waves and the structure of the upper mantle based on observations in Europe. — Commun. Obs. Roy. Belg., ser. Geophys., 1971, N 101, 198–199.
- Seismic studies in the Andes. — Trans. Amer. Geophys. Union, 1958, 39, N 3, 580–582.
- Shamina O.G. Experimental investigation of necessary and sufficient characteristics of a waveguide. — Studia Geophys. Geodaet., 1966, 10, 341–350.
- Shamina O.G. Die Abhängigkeit der P-Wellen-Amplitude von der Herdtiefe (seismologische, rechnerische und Modellangaben). Papers 9th Assembly Europ. Seismol. Commis. Copenhagen, 1966, København, 1967, 115–124.
- Shebalin N.V. Correlation between magnitude and intensity of earthquakes and asthenosphere. — Publ. Bur. Centr. Seismol. Internat., 1959A, N 20, 31–37.
- Sheridan R.E., Houtz R.E., Drake C.L., Ewing M. Structure of continental margin off Sierra Leone. West Africa. — J. Geophys. Res., 1969, 74, N 10.
- Shibata I. Mantle by the surface waves of the earthquake. — J. Geogr., 1961, 70, N 5, 26–29.
- Shor G.G. Jr. Seismic refraction studies off coast of Alaska 1956–57. — Bull. Seismol. Soc. America, 1962, 52, N 11.
- Shor G.G. Jr. Seismic refraction profile in Coral Sea Basin. — Science, 1967, 158.
- Shor G.G. Jr. Explosions seismology at sea. — Trans. Amer. Geophys. Union, 1967, 48, N 2, 415–420.
- Shubert D.H. The high-frequency S-phase and structure of the earth's mantle. — J. Geophys. Res., 1964, 69, N 10, 2065–2070.
- Shubert D.H. Upper mantle structure beneath the Gulf of Mexico. — Bull. Geol. Soc., America, 1968, 79, N 11, 1647, 1649.
- Shubert D.H. Low-velocity layer in the upper mantle beneath Mexico. — Bull. Geol. Soc. America, 1972, 83, N 11, 3475–3477.
- Sieberg A. Erdbebenkunde. Jena, 1923.
- Sieberg A. Geologische, physikalische und angewandte Erdbebenkunde. Jena, Verl. Fischer, 1923.
- Sieberg A. Geologische Einführung in die Geophysik. Jena, 1927.
- "Significance and achievements of the upper mantle Project." — Tectonophysics, 1972, 13, N 1–4, 1–5.
- Simpson D.W., Wright C., Cleary J.R. Double discontinuity in the upper mantle. — Nature, Phys. Sci., 1971, 231, N 26, 201–203.
- Slichter L.B. The theory of the interpretation of seismic travel-time curves in horizontal structures. — Physics, 1932, 3, N 6, 273–295.
- Smith S.W. A reinterpretation of phase velocity data based on the Gnome travel-time curve. — Bull. Seismol. Soc. America, 1962, 52, 1031–1035.
- Smith W.E.T. Bibliography of seismology. Items 9133–9381. — Publs. Domin. Astrophys. Obs., 1957, 14, N 18, p.385–409.
- Smith W.D. Upper mantle velocities determined from local observations of deep earthquakes. — Bull. Seismol. Soc. America, 1973, 63, N 3, 807–817.
- Smoluchowski M. Einige Bemerkungen über die physikalische Grundlagen der Theorien der Gebirgsbildung. — Kosmos, 1909, 34, N 7–9.

- Solomon S.C. Seismic wave attenuation and partial melting in the upper mantle of North America. — *J. Geophys. Res.*, 1972, 77, N 8, 1483–1502.
- Solomon S.C. On Q and seismic discrimination. — *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 1972, 1, 31, N 1–3, 163–177.
- Solomon S.C. Shear wave attenuation and melting beneath the mid-Atlantic ridge. — *J. Geophys. Res.*, 1973, 78, N 26, 6044–6059.
- Solovyev S.L., Solovyeva O.N. Determination of magnitude for Kurile–Kamchatka earthquakes. — *Studia geophys. et geod.*, 1968, N 12.
- Sorrells G.G., Crowley J.B., Veith K.F. Methods for computing ray paths in complex geological structures. — *Bull. Seismol. Soc. America*, 1971, 61, N 1.
- Springer D. P-wave coupling of underground nuclear explosions. — *Bull. Seismol. Soc. America*, 1966, 56, N 4, 811–876.
- Starovoit O.E., Savarensky E.F., Fedorov S.A. Dispersion of the long-period surface waves and structure of the earth's mantle. Papers 9th Assembly Europ. Seismol. Comm. Copenhagen, 1966, København, 1967, 235–243.
- Starovoit O.E., Savarensky E.F., Fedorov S.A. The structure of the Earth's mantle and observations of long-period surface waves. — *Gerlands Beitr. Geophys.*, 1968, 77, N 3, 205–214.
- Stegen L. Seismische Untersuchungen der Tiefenstruktur der Erdkruste in Ungarn. — *Studia geophys. et geod.*, 1958, 2, N 2, 177–181.
- Steinhart J.S. Lake Superior seismic experiment: shots and travel times. — *J. Geophys. Res.*, 1964, 69, N 2, 5335–5352.
- Steinhart J.S. Continental explosion studies. — *Trans. Amer. Geophys. Union*, 1966, 47, N 1, 269–275.
- Steinhart J.S. Explosion studies of the continents. — *Trans. Amer. Geophys. Union*, 1967, 48, N 2, 412–415.
- Stoneley R. The thickness of the continents. — *Vistas in Astronomy*, v. 2, London–N.Y., 1956, p. 842–849.
- Stoneley R. Physics and Chemistry of the Earth, v. IV, London, Pergamon Press, 1961, p. 239.
- Stoneley R. The interior of the earth. — *Advanc. Sci.*, 1961, 18, N 74, 339–350.
- Su S.S., Dorman J. The use of leaking modes in seismogram interpretation and in studies of crust–mantle structure. — *Bull. Seismol. Soc. America*, 1965, 55.
- Subbotin S.I., Sollogub V.B., Chekunov A.V., Chirvinskaya M.V., Turchanenko N.T., Garkalénko J.A. New data on crustal structure of the Ukraine. — *Internat. Geol. Conf. Rept 23rd Sess. Czechosl.*, 1968. Proc. Sec. 5. Prague, 1968, 1, 121–128.
- Subbotin S., Sollogub V., Prosen D., Dragašević T., Mituch E., Posgay K. Crustal structure of southeastern Europe according to the data of deep seismic soundings. — *Bull. Geofis. teor. et appl.*, 1968, 10, N 39, 241–264.
- Sutton G.H., Major M., Ewing M. Oceanic Rayleigh–waves dispersion in the period range 15–140 seconds. — *Bull. Seismol. Soc. America*, 1959, 49.
- Sutton G.H., Walker D.A. Oceanic mantle phases recorded on seismographs in the Northwestern Pacific at distances between 7 and 40°. — *Bull. Seismol. Soc. America*, 1972, 62, N 2, 631–655.
- Suzuki Z. Travel-time of P in Japan in the distance range of 0–15°. 14 IUGG General Assembly, Abstr. Papers, Switzerland, 1967.
- Sykes L., Landisman M., Satô Y. Mantle shear wave velocities determined from oceanic Love and Rayleigh wave dispersion. — *J. Geophys. Res.*, 1962, 67, N 13, 5257–5271.
- Takeuchi H. Theory of the earth's interior. Waltham, — Toronto–London, 1966.
- Takeuchi H., Hamano Y., Hasegawa Y. Rayleigh– and Love–wave discrepancy and the existence of magma pockets in the upper mantle. — *J. Geophys. Res.*, 1968, 73, N 10, 3349–3350.
- Takeuchi H., Press F., Kobayashi N. On mantle Rayleigh waves (abstr.). Program 1959 Meeting, Cordilleran Sect. Geol. Soc. Amer. 1959, 58; *Bull. Seismol. Soc. America*, 1959, 49, 335.
- Takeuchi H., Press F., Kobayashi N. Mantle Rayleigh–waves and mantle structure. — *Bull. Geol. Soc. America*, 1959, 70, N 12, part 2, 1752.
- Takeuchi H., Saito M., Kobayashi N. On the Jeffreys model of the earth crust and mantle. — *J. Seismol. Soc. Japan*, 1962, 15, N 3, 183–194.
- Talwani M., Le Pichon X., Ewing M. Crustal structure of the Mid–Oceanic Ridges. 2. Computed model from gravity and seismic–refraction data. — *J. Geophys. Res.*, 1965, 70, N 2.
- Tandon A.N. Upper mantle seismic wave velocities. — *Indian J. Meteorol. Geophys.*, 1967, 18, 385–390.
- Tandon A.N., Chaudhury H.M. Records of mantle Rayleigh waves at Delhi. — *Indian J. Meteorol. and Geophys.*, 1965, 16, N 3, 395–410.
- Taranov R.S. The upper mantle velocity section in a transitive zone from the Asia continent to the Pacific Ocean. — *Publ. Bureau centr. seismol. internat. Travaux Sci.*, ser. A, fasc. 23. Toulouse, 1964.

- T a r a k a n o v R. Z., L e v i y N. V. A model for the upper mantle with several of Love-velocity and strength. — The crust and upper mantle of the Pacific Area. A.G.U., monogr. 12. Washington, 1968.
- T a t e l H.E., T u v e M.A. Seismic exploration of a continental crust. — Geol. Soc. America Spec. paper., 1955, 62, 35–50.
- "The earth as a planet". Kuiper G.P. (Ed.) Chicago, Univ. Press, 1954.
- T e u p s e r C. H. R. Die Methoden der Seismologie zur Erforschung des oberen Erdmantels. — Monatsber. Dtsch. Akad. Wiss. Berlin, 1965, 7, N 2, 136–145.
- "The Earth's mantle". Gaskell T.F. (Ed.). London. — N.Y., Acad. Press, 1967.
- "The interior of the Earth". — Nature, 1961, 191, N 4792, 983.
- T e n g T a L i a n g, T u n g J. P. Upper mantle discontinuity from amplitudes data of P'P' and its precursors. — Bull. Seismol. Soc. America., 1973, 63, N 2, 587–597.
- "The structure of the crust and mantle beneath inland and marginal seas". — Sympos. Madrid, 1969, — Tectonophysics, 1970, 10, N 5–6, 471–677.
- T i l l o t s o n E. The constitutions of the earth to a depth. 750 km. — Occas. Notes. Roy. Astron. Soc., 1953, 3, N 15, 14–27.
- T o k s ö z M. N. Crust and upper mantle structure under island arcs (Abstr.). — Trans. Amer. Geophys. Union, 1967, 48, N 1, 219.
- T o k s ö z M. N. Velocity structure and inhomogeneities of the Earth's mantle. — C.r. Union géodés. et géophys. internat., 1969, N 15, pt. 1, 77.
- T o k s ö z M. N., A n d e r s o n D. L. Phase velocities of long-period surface waves and structure of the upper mantle. — J. Geophys. Res., 1966, 71, N 6.
- T o k s ö z M. N., A r k a n i - H a m e d J., K n i g h t C. A. Geophysical data and long-wave heterogeneities of the earth's mantle. — J. Geophys. Res., 1969, 74, N 15, 3751–3770.
- T o k s ö z M. N., B e n - M e n a c h e m A. Velocities of mantle Love and Rayleigh waves over multiple paths. Bull. Seismol. Soc. America, 1963, 53, N 4.
- T o k s ö z M. N., C h i n n e r y M. A. Seismic travel-times from Longshot and structure of the mantle. — Trans. Amer. Geophys. Union, 1966, 47, N 1, 164.
- T o k s ö z M. N., C h i n n e r y M. A., A n d e r s o n D. L. Inhomogeneities in the earth's mantle. — Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 1967, 13, N 1–3, 31–59.
- T o k s ö z M. N., F o l i n s b e e R. A. Crust and upper mantle structure under island areas. — Trans. Amer. Geophys. Union, 1966, 47, N 3, 489–490.
- L e T o u r n e a u N. J., P i e r m a t t e i R., W a l k e r D. A. Mantle Phases recorded at Guam for distances between 1 and 52°. — Ann. Geophys., 1972, 25, N 3, 433–450.
- Travel time curve of near earthquakes in Japan area and some related problems. XI. Procedures and preliminary results. — Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ., 1967, 45, N 3.
- T r i g g v a s o n E. Wave velocity in the upper mantle below the Arctic-Atlantic ocean and North-West Europe. — Ann. Geophys., 1961, 14, N 4.
- T r i g g v a s o n E. Crustal structure of the Iceland region from dispersion of surface waves. — Bull. Seismol. Soc. America, 1962, 52, N 2.
- T r i g g v a s o n E. Arrival times of P waves and upper mantle structure. — Bull. Seismol. Soc. America, 1964, 54, N 2.
- T r i g g v a s o n E. Dissipation of Rayleigh waves energy. — J. Geophys. Res., 1965, 70.
- T r i g g v a s o n E., Q u a l l s B. R. Seismic refraction measurements of crustal structure in Oklahoma. — J. Geophys. Res., 1967, 72, N 14, 3738–3740.
- T s e n g J u n g S h e n g, S u n g Z i - A n. Phase velocities of Rayleigh Waves in China. — Acta Geophys. Sinica, 1963, 12, N 2.
- T u k e y J. W. Data analysis and the frontiers of geophysics. — Science, 1965, 148, 3675, 1283–1289.
- T u r n e r H.H. Revised seismological tables and the earth's liquid core. — Monthly Notices Royal. Astron. Soc. Geophys. Suppl., 1926, 1, N 8, 425–446.
- U f f e n R.J. A method of estimating the melting point gradient in the earth's mantle. — Trans. Amer. Geophys. Union, 1952, 33, 893.
- U n d e r w o o d R.A. A seismic refraction study of the crust and upper mantle in the vicinity of East strait. — Austral. J. Phys., 1969, 22, N 5, 573–587.
- "Upper Mantle Project". — Trans. Amer. Geophys. Union, 1964, 45, N 3, 565–568.
- "Upper Mantle Project (UMP)". Chronique UGGI, 1969, N 78, 267–282.
- U. S. National report, 1967–1971 Fifteenth General Assembly International Union of Geodesy and Geophysics. (Moscow, USSR, August 2–15, 1971). — Amer. Geophys. Union, Washington, 1971.
- U t s u T. Anomalies in seismic waves velocity and attenuation associated with a deep earthquake zone (I). — J. Fac. Sci. Hokkaido Univ., ser. VII, 1967, 8, N 1.

- Utsu T., Okada H. Anomalies in seismic wave velocity and attenuation associated with a deep earthquake zone (Pt.2). J. Fac. Sci. Hokkaido Univ., ser. VII, 1968, v. VIII, N 2.
- Vaněk J. Die Amplituden von PP- and SS-Wellen in der Nähe von 40° und die Sreuktur des äusseren Erdmantle. — Ann. geofis., 1959, 12, N 2, 239–247.
- Vaněk J. Amplitude curves of longitudinal waves from several three-dimensional models of upper mantle. — Studia geophys. et geod., 1966, N 10.
- Vaněk J. Amplitude curves of seismic body waves for the regions of Asia Minor. — Trav. Inst. Geophys. Acad. Tcheosl. Sci., 1966<sub>1</sub>.
- Vaněk J. Three-dimensional seismic models of the upper mantle. — Studia geophys. et geod., 1967, 11, N 3, 337–339.
- Vaněk J. Amplitude curves of seismic body waves and the structure of the upper mantle in Europe. — Tectonophysics, 1968, 5, N 3, 235–243.
- Vaněk J. Seismological evidence on discontinuities in the mantle. — Z. Geophys., 1972, 38, N 3, 355–367.
- Vaněk J., Radu C. Amplitude curves of seismic body waves at distance smaller than 12°. — Studia geophys. et geod., 1964, 8, 319–325.
- Vaněk J., Stelzner J. Oscillatory character of amplitude curves of seismic body waves, 1960, 187, 491–492.
- Vaněk J., Stelzner J. Einheitliche Bestimmung von Erdbebenmagnituden für Mitteleuropäische Stationen. — Travaux Inst. Géophys. Acad. Tchéosl. Sci., N 136, Geofys. sb., 1960<sub>1</sub>
- Vaněk J., Stelzner J. Amplitudenkurven der seismischen Raumwellen. — Gerlands Beitr. Geophys., 1962, 71, N 2.
- Vaněk J., Waniek L., Pros Z., Klima K. Theedimensional seismic models with continuously variable velocity. — Nature, 1964, N 9336, 6.
- Varma G. S. P-wave velocities in the upper mantle of Indian sub-continent from Russian nuclear explosions, an inferred upper mantle structure. — Indian J. Meteorol. and Geophys., 1970, 21, N 3, 485–488.
- Vecchia O. Le esplosiononnell Alpi piemonteti (1960) per lo studio sismico della litosfera. — Notiz. Ricerca scient., 1962, N 9, 797–805.
- Verreault F. L'inversion des périods propres dde torsion de la Terre. — Ann. Géophys., 1965, 21, N 2, 252–264.
- Verreault F. Etude physique du manteau par l'inversion des periodes propres de torsion de la Terre. — C.r. Acad. sci., Paris, 1965<sub>1</sub>, 261, N 3, 773–775.
- Vesanen E. Ueber die typenanalytische Auswertung der Seismogramme. — Ann. Acad. Sci. Fenn., ser. AIII, 1942, 5, 1.
- Vesanen E., Nurmi M., Porkka M.T. New evidence for the existence of Gutenberg's asthenospere channel. — Geophysica (Helsinki), 1959, 7, N 1.
- Vicent R. O. Inversion methods for a standart earth model. — Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 1973, 35, N 1–3.
- Vinnik L. P., Lukk A. A., Nikolaev A. V. Inhomogeneities in the lower mantle. — In: "The state of substances in the Earth's Interior" Amsterdam, 1972, p. 328–331. Phys. Earth Planet. Inter., 5, N 4.
- Vedenskaya A. V., Balakina L. M. On some peculiarities of the displacement field on the longitudinal and transverse waves propagating in the earth's mantle. — Publ. Bur. Centr. séismol. internat., 1959, A, N 20, 145–149.
- Wadati K. Shallow and deep eartquakes. — Geophys. Mag., 1928, 1, N 4.
- Wadati K. Shallow and deep earthquakes. — Geophys. Mag., 1929, 11, N 1.
- Wadati K. On the travel-time of earquake waves (Pt II) Geophys. Mag., 1933, 7, 101–111.
- Wadati K., Hirono T. Magnitudes of earthquakes especially of near, deep focus earthquakes. — Geophys. Mag., 1956, 27, N 1.
- Wadati K., Hirono T., Yumura T. On the attenuation of S –waves and the structure of the upper mantle in the region of Japanese. Islands—Papers Meteorol. and Geophys., 1969, 20, N 1, 49–78.
- Wadati K., Hirono T., Yumura T. The absorption of transverse wave in the upper mantle under Japan. — C. r. Union géodés. et géophys. internat., 1969<sub>1</sub>, N 15, pt. 1, 177.
- Wadati K., Iwai Y. The minuta investigation of seismicity in Japan (I). — Geophys. Mag., 1954, 25, N 3–4, 167–173.
- Wadati K., Iwai Y. The minute investigation of seismicity in Japan. (2nd paper). — Geophys. Mag., 1956, 27, N 1, 11–15.
- Wadati K., Masuda K. On the travel of earthquake waves (Pt V). — Geophys. Mag., 1933, 7, 269–290.
- Wadati K., Masuda K. On the travel time of earthquake waves (Pt VI). — Geophys. Mag., 1934, 8, 187–194.

- Wadati K. Oki S. On the travel-time of earthquake waves (Pt III, IV). — *Geophys. Mag.*, 1933, 7, 113–137, 139–153.
- Wadati K., Sagisaka K., Masuda K. On the travel-time of earthquake waves (Pt I). — *Geophys. Mag.*, 1933, 7, 87–99.
- Walker D.A. A study of the Northwestern Pacific upper mantle. — *Bull. Seismol. Soc. America*, 1965, 55, N 5, 925–939.
- Walker D.A., Sutton G.H. The agreement of proposed earth models with observed body-wave travel-times. — *Bull. Seismol. Soc. America*, 1968, 58, N 3, 1059–1069.
- Walker D.A., Sutton G.H. Oceanic mantle phases recorded on hydrophones in the Northwestern Pacific at distances between 9 and 40°. — *Bull. Seismol. Soc. America*, 1971, 61, N 1, 65–78.
- Wang-Chi-Yuen. Phase change in the upper mantle above 350 km. — *Nature*, 1970, 227, 5261.
- Wang-Chi-Yuen. A simple earth model. — *J. Geophys. Res.*, 1972, 77, N 23, 4318–4329.
- Warren D.H. A seismic-refraction survey of crustal structure in Central Arizona. — *Bull. Geol. Soc. America*, 1969, 80, N 2, 257–282.
- Washington Conference on theoretical geophysics, 1956. — *J. Geophys. Res.*, 1956, 61, N 2, pt.2; p. 317–414.
- Weidner D.J. Rayleigh wave phase velocities in the Atlantic Ocean. — *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 1974, 36, N 1, 105–139.
- Wesson R.L. Travel-time inversion for laterally inhomogeneous crustal velocity models. — *Bull. Seismol. Soc. America*, 1971, N 3, 729–746.
- Whitcomb J.A., Anderson D.L. Reflection of P'P' seismic waves from discontinuities in the mantle. — *J. Geophys. Res.*, 1970, 75, N 29, 5713–5728.
- White R.E. P-wave velocities in the upper mantle beneath the Australian Shield from earthquake data. — *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 1971, 24, N 2, 109–118.
- Wickens A.J. Variations in lithospheric thickness in Canada. — *Canad. J. Earth Sci.*, 1971, 8, N 9, 1154–1162.
- Wickens A.J., Pec K. A crust-mantle profile from Mould Bay, Canada, to Tuoson, Arizona. — *Bull. Seismol. Soc. America*, 1968, 58, N 6, 1821–1831.
- Wiechert E. Über die Beschaffenheit des Erdinnern (Jena, 1924). — *Sitzungsber. phys. ökon. Ges. Königsberg*, 1896, 37, 4–5.
- Wiechert E. Über die Massenverteilung im Innern der Erde. — *Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, Math.-Phys. Kl.*, 1897, H. 3, 221–243.
- Wiechert E. Die Erdbebenforschung, ihre Hilfsmittel und ihre Resultate für die Geophysik. — *Phys. Z.*, 1907, 9, 36–47.
- Wiechert E. Über Erdbebenwellen. I. Theoretisches über die Ausbreitung der Erdbebenwellen. — *Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, Math.-Phys. Kl.*, 1907, 1, 1–115.
- Wiechert E., Geiger L. Bestimmung des Weges der Erdbebenwellen im Erdinnern. — *Phys. Z.* 1910, 11, 294–311.
- Wiggins R.A. Monte Carlo inversion of body wave observations. — *J. Geophys. Res.*, 1969, 74, 3171–3181.
- Wiggins R.A. The general linear inverse problem implications on Earth structure. — *Rev. Geophys. Space Phys.*, 1972, 10, N 1.
- Willmore P.L., Hales A.L., Gane P.G. A seismic investigation of crustal structure in the Western Transvaal. — *Bull. Seismol. Soc. America*, 1952, 42, 53–80.
- Witte H. Beiträge zur Berechnung der Geschwindigkeit der Raumwellen im Erdinnern. — *Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, Math.-Phys. Kl.*, 1932, 199–241.
- Wu F.T. Mantle Rayleigh wave dispersion and tectonic provinces. — *J. Geophys. Res.*, 1972, 77, N 32, 6445–6453.
- Yamamoto S. Sur les phases nouvelles de la sismophysique. *Ann. phys.*, sér. 10, 1, Mai–Juni, 1924.
- Yanovskaya T.R., Asbel I.J. The determination of velocities in the upper mantle from the observation on P-waves. — *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 1964, 8, N 3, 313–318.
- Yoshii T. On the Pn velocity and the seismological features of the upper mantle in Japan. — *J. Seismol. Soc. Japan*, 1971, 24, N 2, 107–116.
- Yoshii T., Ludwig W.J., Den N., Murauchi S., Ewing M. Structure of southwest Japan margin off Shikoku. — *J. Geophys. Res.*, 1973, 78, N 14, p. 2517–2525.
- Zöppritz K. Über Erdbebenwellen. II. Laufzeitkurven. — *Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, Math.-Phys. Kl.*, 1907, 529–549.
- Zöppritz K., Geiger L. Ueber Erdbebenwellen. III. Berechnung von Weg und Geschwindigkeit der Vorläufer. Die Poisson'sche Konstante im Erdinnern. — *Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, Math.-Phys. Kl.*, 1909, 400–429.
- Zöppritz K., Geiger L., Gutenberg B. Über Erdbebenwellen. V. Konstitution des Erdinnern, erschlossen aus dem Bodenverrückungsverhältnis der einmal reflektierten zu den direkten longitudinalen Erdbebenwellen, und einige andere Beobachtungen über Erdbebenwellen. — *Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, Math.-Phys. Kl.*, 1912.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ . . . . .	5
Глава I	
ОДНОЗНАЧНАЯ ТРАКТОВКА ПЕРВЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О МАНТИИ (1897 г. – 20-е ГОДЫ XX В.). . . . .	7
1. Становление сейсмических исследований мантии . . . . .	-
2. Первые скоростные модели мантии. Однозначность трактовки получаемых результатов . . . . .	8
Выводы . . . . .	14
Глава II	
ЗАРОЖДЕНИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ВОЗМОЖНОЙ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ (20-50-е ГОДЫ XX В.) . . . . .	15
1. Рост количества сейсмических данных о строении мантии. Возникновение неоднозначности в оценке сейсмического материала . . . . .	-
2. Попытки преодоления неоднозначности – научная дискуссия Гутенберга и Джеффриса . . . . .	18
3. Первые догадки о неоднозначности трактовки стандартного разреза и экспери- ментальное подтверждение неоднородности мантии (работы Дж. Макелвейна, Е.Ф. Саваренского, Л.Б. Слехтера) . . . . .	23
Выводы . . . . .	25
Глава III	
ИНФОРМАЦИОННЫЙ ВЗРЫВ В СЕЙСМОЛОГИИ. ОСОЗНАНИЕ ВЕРОЯТНОСТ- НОГО ХАРАКТЕРА ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О МАНТИИ (с 1957 г.) . . . . .	27
1. Создание предпосылок детального изучения мантии в международном мас- штабе (идеи В.В. Белоусова). . . . .	-
2. Причины возникновения новых научных подходов . . . . .	28
1. Рост мировой сейсмической сети . . . . .	28
2. Группирование станций . . . . .	29
3. Совершенствование и стандартизация аппаратуры . . . . .	31
4. Развитие сейсмологии взрывов . . . . .	32
5. Расширение информационного обмена и международных связей . . . . .	35
6. Получение новых видов информации о строении мантии . . . . .	37
Изучение динамических характеристик сейсмических волн . . . . .	-
Моделирование сейсмических явлений . . . . .	39
Изучение поверхностных волн . . . . .	40
Изучение затухания сейсмических волн в мантии . . . . .	43
3. Коренные изменения в научных подходах к изучению мантии . . . . .	44
1. Доказательства существования волновода, установление горизонтальных неоднородностей мантии. Недостаточность стандартного годографа . . . . .	-
2. Информационный взрыв и внедрение ЭВМ в сейсмологию . . . . .	49
3. Вероятностный, статистический характер представлений о мантии. Построение стохастических моделей реальных сред . . . . .	51
4. Преодоление неопределенности представлений о мантии (детальные сейсми- ческие исследования в отдельных регионах и комплексный подход к оценке сейсмических данных) . . . . .	55
5. Преодоление противоречий между дискретным характером данных и не- прерывным характером изучаемой структуры . . . . .	58
4. Результаты применения современных подходов к изучению мантии – уточнение общих закономерностей в строении мантии и их конкрети- зация в различных регионах . . . . .	60
Выводы . . . . .	76

Глава IV

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ . . . . . 77

1. Развертывание детальных исследований в ряде районов и развитие методов  
интерпретации данных . . . . . -
2. Комплексный подход к изучению мантии Земли как часть геонимического  
подхода, предложенного В.В. Белоусовым . . . . . 78
3. Системный подход к сейсмологии мантии в целях оптимизации исследований . . . . . 79

Выводы . . . . . 82

ЗАКЛЮЧЕНИЕ . . . . . 83

Abstract . . . . . 84

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ . . . . . 85

## CONTENTS

INTRODUCTION .....	5
Chapter I	
UNIVARIANT INTERPRETATION OF THE FIRST CONCEPTIONS OF THE MANTLE (1897- THE TWENTIES OF THE XX CENTURY) .....	7
1. Beginning of seismic researches of the mantle .....	-
2. The first velocity models of the mantle. The univariant interpretation of the obtained results .....	8
Conclusions .....	14
Chapter II	
CONCEPTS OF THE POSSIBLE COMPLEXITY INTERPRETATION (THE TWENTIES- THE FIFTIES OF THE XX CENTURY) .....	15
1. Growth of the amount of seismic data about the structure of the mantle. The appearance of complexity in the evaluation of seismic material .....	-
2. Attempts to overcome complexity: a scientific discussion between Gutenberg and Jeffries .....	18
3. The first conjectures about the inadequacy of univariant interpretation of the mean velocity cross-section and experimental confirmation of the inhomogeneity of the mantle (works by G. Macelvein, Ye.F. Savarensky, L.B. Slikhter) .....	23
Conclusions .....	25
Chapter III	
INFORMATION EXPLOSION IN SEISMOLOGY. APPROACH TO THE PROBABILIS- TIC-STATISTICAL CHARACTER OF CONCEPTS ABOUT THE MANTLE (SINCE 1957) .....	27
1. Preliminary conceptions of detailed study of the mantle on the international scale (ideas of V.V. Belousov) .....	-
2. Causes of the new scientific approaches. ....	28
1. Expansion of the world seismic network .....	-
2. Grouping of stations .....	29
3. Improvement and unification of instruments .....	31
4. Development of explosion seismology .....	32
5. Extension of information exchange and of international relations .....	35
6. New forms of information about the structure of the mantle .....	37
The study of not only kinematic, but also dynamic characteristics of seismic waves .....	-
Modelling of seismic phenomena .....	39
The study of surface waves .....	40
The study of seismic waves attenuation in the mantle .....	43
3. Cardinal changes in scientific approaches to the study of the mantle .....	44
1. Evidence proving the existence of the waveguide, establishment of horizontal inhomogeneities of the mantle and the ensuing understanding of the insufficiency of the standard travel time curve .....	-
2. Information explosion and application of computers in seismology .....	49
3. Realization of the probabilistic-statistical character of the ideas about the mantle. Construction of stochastic models of actual media .....	51

4. An overcoming ambiguity in the understanding of the mantle (detailed seismic studies in certain regions and the elaboration of a complex approach to the evaluation of seismic data) . . . . .	55
5. An overcoming the discrepancy between the discrete character of data and the continuous character of the studied structure . . . . .	58
4. Results of the realization of new scientific approaches. . . . .	60
Conclusions . . . . .	76

Chapter IV

BASIC TRENDS OF FURTHER DEVELOPMENT OF SEISMIC STUDIES OF THE UPPER MANTLE . . . . .	77
--	----

1. Extension of detailed studies in a number of regions and development of methods of data interpretation . . . . .	-
2. Complex approach to the study of the Earth's mantle as a part of the geonomic approach, proposed by V.V. Beloussdov . . . . .	78
3. System approach to the seismology of the mantle with the purpose of optimization of researches . . . . .	79
Conclusions . . . . .	82

GENERAL CONCLUSIONS. . . . .	83
------------------------------	----

Abstract . . . . .	84
--------------------	----

BIBLIOGRAPHY . . . . .	85
------------------------	----

Екатерина Николаевна Милотина

**СЕЙСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ВЕРХНЕЙ МАНТИИ**

Эволюция методологии

Утверждено к печати  
Межведомственным геофизическим комитетом

Редактор *В.М. Медер*  
Технический редактор *Г.Л. Каренина*

Подписано к печати 21/V – 76 г. Т – 03591

Усл.печ.л. 11,9. Уч.-изд.л. 15,1

Формат 70x108 1/16. Бумага офсетная № 1

Тираж 1050 экз. Тип. зак. 111

Цена 1 р. 06 к.

Книга издана офсетным способом

Издательство "Наука",  
103717, ГСП, Москва, К-62, Подсосенский пер., 21  
1-я типография издательства "Наука".  
199034, Ленинград, В-34, 9-я линия, 12

1 p. 06 к.

1711