

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ОРДЕНА ЛЕНИНА ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ им. О.Ю.ШМИДА

На правах рукописи

АРУТЮНЯН
Альберт Вирабович

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ И ПЛОТНОСТИ БАЗИТОВ
И УЛЬТРАБАЗИТОВ ОФИОЛИТОВЫХ ПОЯСОВ АРМЕНИИ ПРИ
ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ ДО 20 КБ.

(на русском языке)

Специальность 01.04.12 - геофизика

А в т о р е ф е р а т.

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва - 1975

На правах рукописи

АРУТЮНЯН

Альберт Вирабович

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ И ПЛОТНОСТИ БАЗИТОВ
И УЛЬТРАБАЗИТОВ ОФИОДИТОВЫХ ПОЯСОВ АРМЕНИИ ПРИ
ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ ДО 20 КБ.

(на русском языке)

Специальность 01.04.12 - геофизика

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва - 1975



Работа выполнена в лаборатории высоких давлений сектора сейсмологии Ордена Ленина Института Физики Земли им.О.Ю. Шмидта АН СССР и в лаборатории экспериментальной сейсмотехники Ереванского Политехнического института.

Научные руководители:

Лауреат Государственной премии,
профессор, доктор физико-математических
наук

М.П.Воларович

Кандидат физико-математических наук

А.М.Левыкин

Официальные оппоненты:

Профессор, доктор технических наук

Н.Н.Павлова

Кандидат физико-математических наук

О.М.Силаева

Оппонирующая организация: ВНИИГеофизика

Автореферат разослан " ____ " _____ 1975г.

Защита диссертации состоится " ____ " _____ 1975г.

на заседании Специализированного Учёного Совета по физике недр Земли Института Физики Земли АН СССР.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ АН СССР.

Адрес: Москва, Д-242, Б.Грузинская, 10.

Учёный секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

В.А.ДУБРОВСКИЙ

Общая характеристика работы.

Актуальность. Для выяснения строения и состава Земных недр, а также процессов, протекающих в них, в настоящее время проводятся комплексные геологические, геофизические, геохимические исследования. В недрах Земли вещество находится под воздействием высоких давлений и температур. В связи с этим особое внимание уделяется изучению физических свойств горных пород в условиях, моделирующих термодинамическую обстановку глубинных слоёв Земли. Такие исследования проводятся во многих лабораториях Советского Союза и за рубежом. Отечественные работы по изучению физических свойств горных пород при высоких давлениях, начатые в пятидесятых годах в Институте физики Земли АН СССР в настоящее время проводятся в ряде других научных институтов.

За рубежом известны работы проведенные в США, ГДР, Японии и других странах. Полученные данные используются для интерпретации результатов глубинного сейсмического зондирования и построения сейсмических разрывов, при создании модели земной коры и верхней мантии для различных регионов земного шара. Некоторые минералы при различных термодинамических условиях претерпевают полиморфные переходы, которые могут связываться с процессами подготовки землетрясений. Изучению этого вопроса в последнее время уделяется большое внимание. Поэтому исследования упругих и плотностных свойств горных пород и минералов при высоких давлениях является актуальной научной и практической задачей.

Цель работы. Армения, которая является одной из сейсмоактивных областей Советского Союза, отличается своим сложным геологическим строением. Данные по упругим и плотностным свойствам горных пород при высоких давлениях необходимы для более однозначной интерпретации сейсмических данных при изучении глубинного строения земной коры на территории Армении. В работе была поставлена задача: исследовать при высоких

0657

давлениях (до 20 кб) комплекс физических параметров основных, ультраосновных, метаморфизованных, а также кальцит-содержащих изверженных горных пород. Необходимо было установить: как влияет на физические характеристики названных пород давление, в зависимости от минералогического состава, структуры, воды - насыщенности и т.д.

Методика исследований. Исследования проводились на установке типа поршень-цилиндр, в которой можно создавать квазигидростатическое давление до 20 кб. Из одного опыта при высоком давлении импульсным ультразвуковым методом определялась скорость продольных и поперечных упругих волн, а статическим методом - декремент объема и плотность образца породы.

Научная новизна и практическая ценность. Впервые исследованы при высоких давлениях упругие и плотностные свойства горных пород офиолитовых поясов Армении, связанных с глубинными разломами. Установлены зависимости скоростей продольных и поперечных упругих волн от минерального состава, плотности и пористости. Результаты исследований воденасыщенных пород, а также полиморфных переходов в карбонатных и впервые полученные в кальцит-содержащих изверженных породах показывают, что сейсмические границы, а также возникновение кратковременных механических процессов в земной коре могут быть связаны с этими явлениями. Установлены значения отношения скоростей продольных и поперечных волн для разных типов горных пород. На основании сопоставления результатов исследований с сейсмологическими данными сделано предположение, что сейсмические границы в нижних частях "базальтового" слоя земной коры, а также поверхность Моху могут быть обусловлены разной степенью серпентинизации ультраосновных горных пород. Установлено хорошее согласие между скоростными разрезами, полученными геофизическими методами, с разрезом, построенным по лабораторным данным, и на этом основании дан предполагаемый состав "базальтового" слоя коры и верхней мантии.

Апробация работы. Материалы диссертации по разделам доложены на следующих конференциях:

1. На IV Всесоюзном совещании по физическим свойствам горных пород при высоких термодинамических параметрах 9-13 октября 1974 г., г.Тбилиси.

2. На республиканской научно-технической конференции молодых научных сотрудников Армении 17-18 декабря 1973 года на Секции наук о Земле в Ереванском политехническом институте им.К.Маркса.

3. На научно-технических конференциях профессоров, преподавателей, научных работников и аспирантов с I-го по 6-е февраля 1971, 1972, 1973, 1975 гг. в Ереванском политехническом институте.

Публикация. По результатам исследований опубликовано 4 научных работы и находятся в печати 2 статьи.

Объем работы. Реферируемая работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов и 2-х приложений. Содержит 120 страниц машинописного текста, 4 таблицы, 80 рисунков и список использованной литературы (260 наименований).

Работа выполнялась в течение 1971-1974 гг. в лаборатории высоких давлений Ордена Ленина Института физики Земли им.О.Ю. Шмидта АН СССР и в лаборатории экспериментальной сейсмотектоники Ереванского политехнического института им.К.Маркса.

Г Л А В А I

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО УПРУГИМ И ПЛОТНОСТНЫМ СВОЙСТВАМ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВЫСОКИХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ.

В первой главе дается краткий обзор и обсуждение работ, посвященных изучению при высоких давлениях упругих свойств метаморфических и изверженных горных пород основного, ультраосновного состава, а также пород, содержащих кальцит. Рассмотрены работы, результаты которых нашли применение при интерпретации полевых геофизических и геологических наблюдений.

Изучение скоростей упругих волн в большинстве случаев проводилось при давлениях до 10-20 кб, при более высоких давле-

ниях (до 40 кб) в образцах изверженных пород проводилось М.П. Воларовичем и А.И.Левыкиным и при давлениях до 55 кб в образцах минералов - А.И.Левыкиным. Влияние температуры и давления на скорости упругих волн в горных породах исследовалось значительно меньше. Этой проблеме посвящены работы Советских учёных М.П.Воларовича, Т.С.Лебедева, Г.М.Авчяна и др. За рубежом такие исследования проводили Ф.Берч, Д.Симмонс и др. В этих работах показано, что давление повышает скорости упругих волн, а температура - снижает. Имеются работы по исследованию влияния водонасыщенности при атмосферном давлении (Н.Б.Дортман, М.Ш.Магид) и при высоких давлениях (Е.И.Баяк, Н.Н.Павлова, Т.С.Лебедев и др.). В этой же главе рассматриваются существующие термодинамические и структурные теории полиморфизма (Бургер, Верма, Кришна и др.). Статическими методами по изучению объёма были обнаружены и рентгенографическими методами установлены полиморфные переходы в ряде химических соединений и в минералах (П.В.Бриджмен, Л.Ф.Верещагин, В.В.Евдокимова, Джекобс, Ю.Н.Рябинин, Л.Д.Лившиц, Ю.С.Геншафт и др.). Некоторые авторы (М.П.Воларович, Е.И.Баяк, А.А.Левыкин, Г.А.Ефимова, Ф.Ф.Воронов, Арэнс и Кац, Ванг, Матсусима и др.) применяли ультразвуковой метод исследования полиморфных превращений в минералах. В области деформационных и прочностных свойств горных пород при сложном напряженном состоянии известны работы Н.Н.Павловой, И.С.Томашевской, А.Н.Ставрогина и др. В настоящее время проведены уже в значительном объёме исследования упругих свойств при высоких давлениях на образцах изверженных пород из различных регионов Советского Союза (Балтийский щит, Укрчина, Казахстан, Камчатка, Северный Кавказ и др.), результаты которых применялись при интерпретации сейсмических разрезов и установлении вещественного состава глубинных слоёв земной коры и верхней мантии. Данный обзор показывает, что плотностные свойства, а также скорости поперечных и одновременно продольных волн в горных породах при высоких давлениях изучены недостаточно.

В связи с выполненным обзором в диссертации ставятся следующие задачи:

1. Исследование влияния давления на упругие и плотностные

свойства образцов горных пород, отобранных из офиолитовых поясов Армении, в зависимости от их минерального состава, структуры, плотности и водонасыщенности.

2. Выяснение влияния серпентинизации на упругие и плотностные свойства ультраосновных пород.

3. Изучение полиморфных переходов в карбонатных и кальцит-содержащих эффузивах в связи с познанием процессов, протекающих в недрах Земли.

4. Использование результатов исследований при интерпретации сейсмических данных, установление вещественного состава земной коры и верхней мантии на территории Армении.

Г Л А В А П

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ СКОРОСТЕЙ УПРУГИХ ВОЛН И ПЛОТНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ.

Во второй главе дано описание аппаратуры высокого давления, а также применявшийся ультразвуковой радиоэлектронно-измерительной схемы, методика измерений скоростей упругих волн, декремента объёма и плотности горных пород. Измерения осуществлялись на установке типа поршень-цилиндр М.П.Воларовича, А.И.Левыкина и Н.Е.Галдина, в которой можно было создать квазигидростатическое давление до 20 кб. В Ереванском политехническом институте была создана модификация вышеуказанной установки, в которой проводилась часть измерений. Средой, передающей давление, является свинец. Ультразвуковые преобразователи были выведены из зоны давления. В качестве излучателей и приёмников применялись пластинки из пьезокерамики ЦТС-19, с частотой собственных колебаний 1-3 мгц. Скорости упругих волн в образцах горных пород при давлениях определялись непосредственным измерением времени пробега ультразвукового импульса во время опыта. По разности времени пробега в системе с образцом и без образца устанавливалось время пробега упругих колебаний в образце. Время пробега в системе определялось тарировочными испытаниями установки по многократным циклам: нагружение-разгрузка. Время пробе-

га упругих волн в свинцовой оболочке рассчитывалось из специальных измерений сжимаемости и скоростей упругих волн в свинце во всем диапазоне давлений. Точность при измерении абсолютных значений скоростей упругих волн в образцах горных пород в интервале давлений 0-20 кб составляла 1,5 - 2%.

Давление в камере определялось делением усилия, приложенного к поршням, на площадь поперечного сечения канала камеры. Поправка на контактное трение уплотнительных колец и передающей давление среды о стенки камеры вычислялась методом прямого и обратного хода поршня. Поправка на деформацию канала камеры под давлением определялась экспериментально: при помощи сопоставления результатов измерения сжимаемости железа-армированного с литературными данными. Точность измерения объемных измерений составляла 4-5%.

Г Л А В А Ш

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ УПРУГИХ СВОЙСТВ И ПЛОТНОСТИ ОБРАЗЦОВ БАЗИТОВ, УЛЬТРАБАЗИТОВ И МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ГОРНЫХ ПОРОД ОФИОЛИТОВЫХ ПОЯСОВ АРМЕНИИ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ ДО 20 КБ.

В главе третьей приведены результаты исследований влияния давления до 20 кб на скорости распространения продольных (v_p) и поперечных (v_s) упругих волн и плотности в образцах базитов, ультрабазитов и метаморфических горных пород, а также влияния водонасыщенности на упругие свойства этих пород. Исследования дали возможность установить величины изменений скоростей и плотности в образцах пород различного минерального состава при разных давлениях. Были изучены упругие и плотностные свойства при высоких давлениях пород, претерпевших изменения состава в результате процесса метаморфизма. Для всех образцов приведены петрографические исследования, а также определены при нормальных условиях плотность (объемный вес), скорости распространения упругих волн и для части образцов - общая пористость.

Для базальтов значения плотности составили $2,39-2,80 \text{ г/см}^3$, пористость колебалась в пределах от 1,52 до 8,20%. Для диабазов и габбро плотность варьирует соответственно от 2,37 до $3,0 \text{ г/см}^3$ и от 2,71 до $3,0 \text{ г/см}^3$. Пористость для образцов диабазов находится в интервале значений от I,11 до II,20% и для габбро от 1,34 до 3,03%. Значения скоростей продольных и поперечных упругих волн в образцах базальтов при атмосферных условиях варьируют от 3,94 до 5,8 км/сек и от 2,38 до 3,42 км/сек соответственно. Для диабазов v_p колеблются от 3,55 до 5,86 км/сек, а v_s от 3,25 до 4,09 км/сек. При повышении давления до 20 кб скорости продольных волн монотонно возрастают. Прирост скорости составляет для образцов базальтов 10-12%, диабазов 8-11% и габбро 7-8%. Увеличение плотности в том же интервале давлений составляло для базальтов 4-6, диабазов 4-5 и габбро 3-4%. Скорости продольных и поперечных упругих волн в образцах ультраосновных пород при нормальных условиях колеблются в значительных пределах: от 4,38 до 7,63 км/сек и от 2,52 до 4,19 км/сек соответственно. Для этих пород плотность варьирует от 2,52 до $3,19 \text{ г/см}^3$, пористость, определенная для части образцов, имела значения 1-2%.

В зависимости от степени серпентинизации ультрабазиты по значениям скоростей упругих волн, а также по плотности были разделены на две группы. В первую группу сведены породы, слабо серпентинизированные (до 3-5%), во вторую отнесены породы, степень серпентинизации которых достигает 10 и более процентов. С повышением давления до 20 кб в образцах пород первой группы v_p увеличивается на 4-5%, достигая значений в отдельных образцах 8,4 км/сек. Плотность в этом же интервале давлений увеличивается на 1-2%. Повышение величины v_p в образцах пород второй группы составляет 7-8%, а плотности 2-4%. Прирост скорости поперечных волн несколько меньше, чем для продольных волн.

Изучены серпентиниты хризотил-антигоритового состава. Образцы серпентинитов при нормальных условиях характеризуются

значениями плотности 2,24-3,08 г/см³, и пористости I,03-II,50%. Скорость продольных волн в них при атмосферном давлении колеблется в достаточно широком интервале от 3,54 до 7,18 км/сек, а поперечных волн от 1,46 до 4,02 км/сек. При повышении давления скорости упругих волн и плотность в серпентинитах с разным содержанием хризотила изменяются различно. В серпентинитах с содержанием хризотила менее 30-35% скорость в интервале давлений 0-20 кб повышается на 6-7%. Для серпентинитов, содержание хризотила в которых достигает 50-55%, повышение скорости составляет II-12%. Серпентиниты, которые содержат 70 и более процентов хризотила, характеризуются наименьшими значениями v_p и v_s . Скорость продольных волн для этой группы серпентинитов возрастает на 18-19%. Кривые $v_s = f(p)$ четко группируются в двух областях. В первой области находятся данные для серпентинитов с содержанием хризотила до 30%, а во второй - для серпентинитов с содержанием хризотила от 30 до 100%. Значения плотности для изученных серпентинитов также дифференцируются в двух областях, которые соответствуют разделению пород по скоростным характеристикам. Повышение плотности в интервале давлений 0-20 кб составляет для первой группы 3-4%, для второй - 7-10%.

Исследования образцов амфиболитов показали, что при нормальных условиях плотность колеблется от 2,60 до 2,93 г/см³, а значение пористости от 0,35 до 6,74%. Скорости продольных волн имеют значения 4,36-6,48 км/сек, а поперечных волн 2,25-3,51 км/сек. Прирост v_p в интервале давлений до 20 кб составляет в среднем 7-8%, а плотности - 3-4%.

Среди исследованных метаморфических пород сравнительно высокими скоростями характеризуются контактовые породы листвениты, которые по составу и структуре представлены кремнистокарбонатными разностями со следами значительных пластических деформаций. Особенностью кривых $v_p = f(p)$ является их волнистый характер. Плотность этих пород изменяется от 2,60 до 2,94 г/см³. Скорости продольных и поперечных упругих волн

варьируют соответственно в пределах от 3,82 до 7,20 км/сек и от 2,22 до 4,11 км/сек. При повышении давления до 20 кб скорости продольных волн в них возрастают на 5-6%, повышение же плотности составляет 2-3%.

В этой же главе представлены результаты определения изменения декремента объема при давлениях до 20 кб. Данные по изменению декремента объема для однотипных пород весьма малочисленны. Образцы слабосерпентинизированных ультраосновных пород характеризуются наименьшими значениями декремента объема, достигающими при давлениях 15-20 кб величины 0,01 - 0,02, а для существенно серпентинизированных ультрабазитов - 0,04-0,05. Наибольшие значения декремента объема в исследованных образцах пород, достигающие величины 0,09-0,1, получены в серпентинитах хризотилового состава. Исследования показывают, что декремент объема существенно связан с величиной начальной плотности и зависит от пористости, а также сжимаемости собственно минералов, входящих в состав породы.

При водонасыщении образцов разных горных пород скорость продольных волн существенно возрастала в условиях атмосферного давления. Повышение давления вызывает различное влияние на скорости упругих волн. По этому принципу все изученные образцы пород разбиваются на три группы. Для образцов первой группы водонасыщение значительно повышает скорость продольных волн, сохраняющуюся при высоких давлениях. В отдельных разностях при давлении 5-10 кб возрастание составляет 12-13%.

Для пород второй группы водонасыщение повышает v_p при атмосферных условиях, при давлении существенного различия в значениях скоростей не наблюдается. В третью группу включены породы, скорости упругих волн в которых при водонасыщении понижаются. Давление способствует дальнейшему их снижению. В отдельных разностях пород снижение скорости при давлениях 10 кб достигает 15%.

Г Л А В А IУ

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ИХ ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Проведенные эксперименты позволили установить значения скорости упругих волн и плотности базитов и ультрабазитов, а также метаморфических горных пород офиолитовых поясов Армении. Рассматриваются факторы, влияющие на скорости упругих волн и плотности при давлениях до 20 кб.

Из приведенных в III главе данных следует, что во всех петрографических разностях пород скорость продольных и поперечных волн возрастает при повышении давления. Характерной чертой кривых $v_p = f(P)$ и $v_s = f(P)$ является наиболее интенсивный рост скоростей в начальном интервале давлений 1-5 кб, который объясняется, как известно, улучшением акустических контактов между зернами минералов за счёт закрытия трещин и микрощелевых пор. При дальнейшем увеличении давления в более широких пределах (до 20 кб) происходит менее интенсивное возрастание скорости вследствие частичного "закрытия" объёмных пор и сжимаемости составляющего породу минерального вещества. Как правило, более плотные образцы пород одного и того же петрографического состава и структуры характеризуются более высокими значениями скоростей упругих волн, чем менее плотные. Это хорошо видно на примере эффузивных и интрузивных разностей пород основного состава. Однако плотность образцов не всегда коррелируется со скоростью упругих волн в них. Это относится к образцам пород как одного и того же, так и разных минеральных составов, что обусловлено петроструктурными различиями. Большое влияние при этом оказывает пористость, увеличение которой, как правило, снижает упругость и повышает сжимаемость горных пород. Форма и размеры пор по разному влияют на v_p и ρ . При объёмной пористости с изометричной формой пор, которая характерна в основном для базальтов, последняя не оказывает особого влияния на скорости упругих волн, однако существенно сни-

жает плотность породы.

Результаты исследований показывают, что области кривых зависимости $v_p = f(\rho)$ для базальтов и диабазов в основном перекрываются. Для них характерной является широкая вариация значений скоростей упругих волн при высоких давлениях, которая обусловлена широкими вариациями плотности, минералогического состава, а также структурными особенностями. Анализ экспериментальных данных по плотности и скоростям упругих волн позволяет сделать вывод, что высокие скорости в образцах габбро по сравнению с базальтами и диабазами связаны с наличием большого количества "высокоскоростных" минералов (пироксен, плагиоклаз) и относительно высокой плотностью. Наблюдается четкая дифференциация значений физических характеристик пород в зависимости от их минерального и химического состава. Установлен рост v_p и ρ с увеличением основности горных пород.

Сопоставление полученных значений скоростей для пород основного состава с имеющимися данными для аналогичных пород других регионов Советского Союза (Центрального Казахстана, Воронежского кристаллического массива, Балтийского и Украинского щитов) показало хорошее совпадение. Однако в нашем случае область кривых $v_p = f(\rho)$ несколько расширена в сторону малых значений.

Высокие значения скоростей в несерпентинизированных ультраосновных породах, достигающие при 20 кб значений 8,2-8,4 км/сек обусловлены главным образом минеральным составом. Эти породы состоят в основном из оливина и пироксена, а в некоторых образцах так же присутствует гранат.

Серпентинизация снижает как плотность, так и скорости упругих волн ультрабазитов. Образцы пород, содержащие 10 и несколько более процентов серпентина, показывают уменьшение v_p на 14% и ρ на 11%. С увеличением количества серпентина увеличивается пластичность и сжимаемость образцов пород.

Если сжимаемость не затронутых вторичными процессами ультрабазитов меньше, чем в породах основного состава в среднем

в 2 раза, то серпентинизированные ультрабазиты имеют примерно одинаковые с основными породами значения сжимаемости. Сравнительный анализ наших данных с результатами, известными в литературе, показывает хорошее согласие для пород слабо и сильно серпентинизированных ультраосновных пород. Это даёт основание предположить, что состав верхней мантии везде достаточно близкий.

Исследование упругих свойств серпентинитов при высоких давлениях имеет важное значение, связанное с проблемой серпентинизации ультрабазитов. Серпентиниты, содержащие 70 и более процентов хризотила, обладают самыми низкими значениями скоростей, плотности и наибольшей пористостью (5-9%). Уменьшение количества серпентина-хризотила и увеличение серпентина-антигорита в образце приводит к увеличению скоростей упругих волн и плотности. Высокие значения скоростей в антигоритовых серпентинитах обусловлены более высокими упругими свойствами серпентина-антигорита, а также малой пористостью образцов этих пород. Кривые $v_p = f(p)$ этой группы в отличие от других серпентинитов имеют волнистый характер. Подобные результаты были получены для антигоритовых серпентинитов Воронежского кристаллического массива. Это явление объясняется (М.П. Вола-рович, А.И. Левыкин, В.Я. Элевич) специфической реакцией пластически деформированной породы на вторичное нагружение, в результате которого в образце происходит перераспределение напряжений. Разделение серпентинитов по величине скорости поперечных волн и плотности на две группы (по величине v_p серпентиниты были разбиты на 3 группы), по-видимому, можно объяснить относительно меньшей чувствительностью поперечных волн к изменению структурных особенностей. Данные по приросту скоростей и плотности показывают, что серпентиниты хризотилового состава являются одними из наиболее сжимаемых горных пород. Значительные изменения плотности с давлением обусловлены особой слоистой структурой минерала хризотила. Сжимаемость серпентинитов уменьшается с увеличением количества серпенти-

на-антигорита, имеющего пластинчатую структуру.

Из метаморфизованных пород отличаются характерной особенностью кривые $v_p = f(p)$ для листвеников, которые так же как и антигоритовые серпентиниты имеют волнистый характер. Это обусловлено тем, что эти породы претерпели в естественных условиях значительные пластические деформации. Значения скоростей для амфиболитов хорошо согласуются с данными, имеющимися в литературе.

Существенное возрастание скорости при водонасыщении всех изученных образцов горных пород при нормальных условиях объясняется увеличением объёмной упругости пород, поскольку система "твёрдое тело - жидкость" имеет большую упругость, чем система "твёрдое тело - газ", а также улучшением акустического контакта между зёрнами и блоками внутри породы. Повышение давления вызывало различное влияние на скорости упругих волн. Для некоторых образцов пород водонасыщение при нормальных условиях существенно повышает скорости упругих волн, однако, при увеличении давления их значения в сухих и влагонасыщенных образцах не имели существенных различий. Это связано с видом пористости. В породах с открытой целевой пористостью влияние давления после водонасыщения на скорости продольных волн очень незначительно. Эффект давления за счёт закрытия трещин близкий с эффектом водонасыщения. В особую группу сведены породы, в состав которых входят глинистый продукт или цементирующий агрегат, вступающие во взаимодействие с водой при насыщении. Глинистый цемент разбухает, ухудшаются акустические контакты между зёрнами минералов, что приводит к нарушению консолидации и падению скорости. При водонасыщении таких образцов упругие свойства породы резко понижаются. При увеличении давления процесс разбухания может усиливаться, так как вода при этом проникает в более глубокие поры. Чем больше глинистого продукта, тем более значительные различия наблюдаются в скоростях для сухих и водонасыщенных образцов.

Для сейсмологии в связи с проблемой природы землетрясений

и их предвестников представляет большой интерес величина отношения скоростей продольных и поперечных упругих волн, изменение которой используется не только при прогнозах землетрясений, но и является одним из критериев для выделения в земной коре участков с повышенным значением коэффициента Пуассона. В настоящее время имеется лишь незначительное число определений величины v_p/v_s для одних и тех же образцов при давлении до 20 кб. В разных типах горных пород при высоких давлениях были вычислены величины отношения скоростей упругих волн. По значениям величины v_p/v_s полученные нами данные разделены на три группы. В первую группу сведены образцы пород, в которых величина v_p/v_s равняется 1,60 - 1,80. Такие значения отношения скоростей имеют несерпентинизированные ультраосновные породы, антигоритовые серпентиниты и листвениты. Все эти породы отличаются наиболее высокими значениями скоростей продольных волн.

Во вторую группу помещены образцы пород, величина v_p/v_s в которых варьирует в пределах 1,80 - 1,90. В эту группу входят породы основного состава - базальты и габбро, слабо серпентинизированные ультрабазиты, антигорит-хризотилитовые серпентиниты с содержанием хризотила до 50% и амфиболиты.

В третью группу входят образцы горных пород, для которых величина v_p/v_s выше значения 1,90. В эту группу входят значительно серпентинизированные ультрабазиты ($> 10\%$), хризотил-антигоритовые и хризотилитовые серпентиниты (хризотила более 55%). В этих образцах наблюдается самый высокий прирост с давлением величины v_p/v_s , достигая в отдельных образцах при давлении 10-15 кб значения 2,3 - 2,4.

Сопоставление полученных нами данных для величины v_p/v_s с сейсмологическими и с лабораторными данными советских, американских и японских исследователей показывают хорошее их согласие.

Далее в этой главе обсуждается вопрос, связанный с применением экспериментальных данных для выяснения возможного вещественного состава выделенных сейсмическими методами слоев земной коры и верхней мантии на территории Армении. По совре-

2564

менным представлениям земная кора на территории Армении состоит из "базальтового", "диоритового", гранитного" и верхнего осадочно-вулканогенного слоев. Последние геофизические исследования выявили новый и интересный факт - наличие слоя пониженных скоростей на подошве земной коры на глубине в среднем 40-52 км в юго-западной части территории Армении. Скорость продольных волн в указанном слое достигает всего лишь 5,1 - 5,3 км/сек. Величина отношения скоростей упругих волн имеет высокое значение. Сейсмологи указанный факт объясняют как результат обводненности указанных горизонтов, что представляется недостаточно убедительным. Сопоставление данных, полученных для серпентинитов и в значительной степени серпентинизированных ультрабазитов, с сейсмическими данными показали, что над поверхностью Мохо на глубине 40-52 км лежит слой пород, который характеризуется такими же скоростями упругих волн, что и хризотилловые серпентиниты. Исходя из этого можно предположить для юго-западной части Армении такую модель земной коры, согласно которой скоростной разрез построен по хорошо согласующимся с геофизическими данными, лабораторным измерениям v_p и v_s (с учётом поправки на температуру). Указанный выше слой пониженных скоростей, обнаруженный сейсмологическими методами, может быть представлен хризотилловыми серпентинитами и долей ультраосновных пород (10-15%). В этом случае скорости продольных волн составляют 5,35-5,55 км/сек. Оценка поправки из-за влияния температуры (принимая последнюю 500°C) уменьшает значения скоростей v_p до 5,1-5,3 км/сек. Интересно отметить, что высокая величина отношения скоростей упругих волн, определенная сейсмическими методами для слоя пониженных скоростей совпадает с лабораторными определениями (2,0 - 2,4). Над указанным слоем, согласно предлагаемой модели, расположены хризотил-антигоритовые серпентиниты со следами пластических деформаций, в которых скорости продольных волн имеют значения при давлениях П1-П2 кб ($H \approx 40$ км) 6,1-6,2 км/сек. Выше этой толщи расположены более деформированные антигоритовые серпентиниты и габброиды, для которых v_p при соответствующих давлениях составляет 7,1-7,65 км/сек. Вероятнее всего, что нет

резкого разделения вещества этих слоев. Происходит постепенный переход состава от антигорит-хризотил-серпентинитового слоя B_3 к верхнему слою B_2 , состоящему из габбро и антигритовых серпентинитов, которые можно объединить в один слой. Над этим слоем прослеживается слой B_1 , который может быть сложен породами основного состава (базальты, диабазы и в малом количестве габброиды). Над слоем B_1 прослеживаются метаморфизованные породы, обладающие высокими значениями скоростей ($v_p = 6,8 - 7,4$ км/сек при $P = 5$ кб). По литературным данным выше расположены породы кислого состава и самый верхний - осадочно-вулканогенная толща (эти породы нами не изучались).

Ниже слоя пониженных скоростей, прослеживаются ультраосновные породы. На основании предложенной модели следует, что поверхность Мохо обусловлена переходом от сильно серпентинизированных пород к несерпентинизированным ультраосновным породам.

Г Л А В А У

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПОЛИМОРФНЫХ ПЕРЕХОДОВ В КАРБОНАТНЫХ И КАЛЬЦИТ-СОДЕРЖАЩИХ МАГМАТИЧЕСКИХ ГОРНЫХ ПОРОДАХ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.

В этой главе представлены результаты изучения скоростей упругих волн и плотности при давлениях до 20 кб в карбонатных и кальцит-содержащих эффузивах. Интерес к этим исследованиям обусловлен специфическим характером кривых зависимости скоростей упругих волн от давления, который у этих пород связан с перестройкой кристаллической структуры кальцита. Ранее в кальците и карбонатных породах рядом исследователей ультразвуковым методом были получены данные, которые в ряде случаев несогласуются между собой. Несогласие объяснилось петроструктурными и другими различиями образцов и неодинаковыми условиями проведения опытов. Влияние давления на скорости упругих волн в кальцит-содержащих эффузивных породах было изучено впервые. В исследованных образцах карбонатных и кальцит-содержащих породах было обнаружено, что в интервалах давлений

2-4 кб и I4-I6 кб наблюдается понижение скоростей продольных волн соответственно на 1-2% и 25-30%. Интервал давлений, в котором наблюдается понижение скоростей, хорошо согласуется с данными, полученными другими авторами.

Исходя из полученных нами и другими авторами данных и учитывая фазовую диаграмму CaCO_3 , предложенную Рапопортом, уменьшение скорости v_p и v_s при давлении 2-4 и I4-I6 кб можно объяснить перестройкой первоначальной структуры кальцита. Переход кальцитовой структуры в арагонитовую при 2-4 кб сопровождается изменением шестерной координации катиона в кальците на девятёрную в арагоните. Возможно, что в интервале I4-I6 кб идёт процесс построения новой модификации кальцита. Как показали опыты, характер минимума в интервале давлений I4-I6 кб изменяется от острого до плавного, что в основном связано с дисперсностью зерен кальцита, а также, как нам представляется, с наличием трещин в породе. Последнее утверждение подтвердилось такими факторами, что образцы, в которых наблюдается наибольшее снижение скорости, имели трещиноватую структуру.

В образцах, где имели место трещины, происходила мраморизация по трещинам. После опыта в трещинах был обнаружен новообразованный кальцит. Это явление связано с необратимыми процессами мраморизации, вследствие которых структура породы претерпевает некоторое изменение. Происходит изменение количества, а также расширение и рост имеющихся трещин в мраморизованных участках. Эти процессы являются причиной снижения скорости при снятии давления. Исследования шлифов до и после опыта также показали, что в некоторых образцах происходит укрупнение зерен кальцита.

Кривые зависимости плотности от давления в интервале 2-4 кб незначительно, а в интервале I4-I6 кб более значительно вылаживаются.

Своеобразные данные по величине v_p/v_s получены для кальцит-содержащих пород, в которых величина v_p/v_s при давлениях I-2 кб варьируют в достаточно широких пределах - I,6-2,1. Во всех образцах в интервале давлений 2-4 кб наблюдается снижение величины v_p/v_s . Это связано, по-видимому, с

процессами, протекающими при полиморфном переходе кальцита в арагонит, а также с явлениями на границах зерен, трещин и пор. Резко выраженный минимум наблюдается также в интервале перехода $\text{CaCO}_3\text{I} - \text{CaCO}_3\text{II}$ при давлении 14–16 кб, после чего с повышением давления величина v_p/v_s вновь увеличивается. Указанный факт свидетельствует о том, что при этой перестройке структуры более резко уменьшается скорость продольных волн, по сравнению с поперечными.

Обсуждение вышеуказанных результатов по карбонатным и кальцит-содержащим эффузивным породам даёт основание высказать предположение о том, что с явлениями полиморфизма в минералах могут быть связаны сейсмические границы (или зоны пониженных скоростей) в отдельных локальных участках земной коры. При полиморфных переходах наблюдается также изменение плотности пород, которые при благоприятных геотектонических ситуациях могут быть связаны с возникновением некоторых кратковременных процессов, протекающих в земной коре, в частности землетрясений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изложены результаты исследований скоростей упругих волн и плотности при давлениях до 20 кб в образцах базитов, ультрабазитов, метаморфизованных пород, а также карбонатных и кальцит-содержащих эффузивов, представленных из офиолитовых поясов Армении. Исследования проводились на установке высокого давления типа поршень-цилиндр с использованием в качестве среды, передающей давление, пластичного твердого тела (свинец).

Из работы можно сделать следующие основные выводы:

1. Усовершенствована установка высокого давления, а также схема ультразвуковой и электронно-измерительной аппаратуры.
2. Исследованы скорости упругих волн, сжимаемость, плотность в образцах различных горных пород офиолитовых поясов Армении при давлениях до 20 кб. Установлено, что по значениям скоростей упругих волн различные типы пород довольно чётко дифференцированы. Эффект давления не одинаков для различных типов пород. Наибольшим приростом скорости и плотности характеризуются

хризотилловые серпентиниты, наименьшей - неизмененные ультра-
базиты.

3. Серпентинизация сильно снижает скорости упругих волн и
плотность ультрабазитов. В зависимости от степени серпентини-
зации скорости упругих волн в ультраосновных породах резко ме-
няются. Можно предположить, что сейсмические границы в нижних
слоях земной коры могут быть обусловлены серпентинизацией
ультрабазитов.

4. Исследования скоростей упругих волн при высоких давле-
ниях и их отношения показывают, что все породы по величине
 v_p/v_s разбиваются на три группы, причём несерпентинизован-
ные ультрабазиты, антигортитовые и с малым содержанием хризоти-
ла серпентиниты, листвениты характеризуются значениями $v_p/v_s =$
 $= 1,6 - 1,8$, а базальты, габбро, слабо серпентинизованные
ультрабазиты, хризотил-антигортитовые серпентиниты и амфиболиты
значениями $v_p/v_s = 1,8 - 1,9$. Для сильно серпентини-
зированных ультрабазитов и хризотилловых серпентинитов величи-
на v_p/v_s наибольшая из всех изученных пород и достигает
значений $1,9 - 2,3$. Таким образом, серпентинизация повышает
пластичность горных пород.

Наиболее низкие значения v_p/v_s ($1,4 - 1,6$) получены
в кальцит-содержащих породах в интервале давлений, соответ-
ствующих перестройке кристаллической структуры при переходе
кальцита-I в кальцит-II ($14-16$ кб).

5. Породы различных стратиграфических комплексов в глу-
бинах земной коры вице поверхности Мохэ могут испытывать воз-
действие воды или различных флюидов. Выявлено различное влия-
ние водонасыщения, в зависимости от состава и структуры горных
пород на скорости упругих волн. Данные исследований показывают,
что сейсмические границы в земной коре могут быть обусловлены
также контактом "сухих" и насыщенных водом или флюидами слоев
пород.

6. Скачкообразное изменение скоростей упругих волн, а в ря-
де случаев и объёма при полиморфных переходах, также могут вы-
зывать достаточно резкие сейсмические границы в отдельных ло-

кальковых участках земной коры. Так, в частности, при переходах кальцита в арагонит до глубины 10 км и $\text{CaCO}_3\text{I} - \text{CaCO}_3\text{II}$ на более значительных глубинах.

7. Результаты изучения скоростей продольных и поперечных упругих волн в образцах пород офиолитовых поясов Армении использованы для построения модели петрографического и скоростного разреза земной коры. Рассматривая представленный экспериментальный материал и сопоставляя его согласно принятой модели разреза с геофизическими данными, полученными при изучении глубинного строения земной коры на территории Армении, можно отметить их хорошее согласие.

8. Поверхность Мохо для изученного района может быть представлена как результат перехода от сильно серпентинизированных пород к несерпентинизированным ультраосновным породам.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах :

1. М.П.Волярович, А.И.Левыкин, А.В.Арутюнян - Скорости упругих волн в образцах горных пород из офиолитовых интрузий Армении при давлениях до 20 кб. В сб. "Физические свойства горных пород при высоких давлениях и температурах", Тбилиси, 1974.

2. А.И.Левыкин, А.В.Арутюнян - Скорости упругих волн и плотность в карбонатных и изверженных кальцит-содержащих горных породах и лиственитах офиолитовых комплексов Армении при давлении до 20 кб. ДАН Арм.ССР LIX № 2, 1974.

3. А.В.Арутюнян - Некоторые результаты исследований скоростей упругих волн в породах из офиолитовых поясов Армении при давлениях до 20 кб. Изв.АН Арм.ССР, науки о Земле, 5, 1974.

4. А.В.Арутюнян - Исследование упругих свойств базитов и ультрабазитов Армении при высоких давлениях (до 20 кб). Тезисы докладов Республиканской научно-технической конференции молодых научных сотрудников Армении. Секция наук о Земле, Ереван, 1973.

5. А.Т.Асланян, М.П.Воларович, А.И.Левыкин, А.Т.Вегуни, А.В.Арутюнян, Л.С.Скворцова - Экспериментальное исследование скоростей упругих волн при высоких давлениях некоторых базитов и ультрабазитов Армении. Изв. АН СССР, сер. физика Земли (в печати).

6. А.Т.Асланян, М.П.Воларович, А.И.Левыкин, А.В.Арутюнян - О составе, строении и упругих характеристиках земной коры и верхней мантии на территории Армении. ДАН Арм.ССР (в печати).

Подписано к печати 24/VI-1975г. Сдано в печать 14/VI-1975г.
Формат 31x42 1/16.

Заказ 509. ВФ 03367. Тираж 120. Бесплатно,

Цех "Ромайор" Ереванского политехнического института
им.К.Маркса, ул.Теряна, 105.

1990