

УДК 550.3:525.2

М. П. ВОЛАРОВИЧ, Г. Ш. ШАГИНЯН, Е. И. БАЮК

## ПЛОТНОСТЬ И СКОРОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНДЕЗИТОВЫХ ПОРОД АРМЕНИИ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Изучение упругих свойств горных пород и минералов при высоких термодинамических параметрах представляет большой интерес для многих разделов геофизики и геологии [4—9]. Так, например, исследование истории глубинных разломов Армении требует сведений о физических характеристиках горных пород из этих зон. Нами образцы собирались вдоль Ереван-Ордубадского глубинного разлома, ширина которого 10—15 км. Территориально эта зона входит в Вединский и Ехегнадзорский районы и охватывает бассейны среднего и верхнего течений р. Веди и правых притоков р. Арпа. Глубинные тектонические разломы являются одним из важнейших структурных элементов земной коры. Отличаясь, как правило, длительностью формирования, они контролируют пространственное развитие формаций горных пород, магматизма, процессов рудообразования, сейсмичности и т. д. [13]. Поэтому изучение глубинных разломов и тяготеющих к ним областей, с целью восстановления истории геологического развития, приобретает научное и практическое значение.

Приуроченность подавляющего большинства разрушительных землетрясений к определенным элементам тектонического строения, в частности, к зонам глубинных разломов земной коры, известна. К такому выводу приводят исследователей и анализ наиболее значительных землетрясений в Армении [3—11]. В этом смысле не составляет исключения и Ереван-Ордубадский глубинный разлом, заложение и развитие которого связывается с тектоническими движениями, действовавшими в этой области на протяжении длительного времени. Следовательно, восстановление истории геологического развития этого разлома может, в частности, сыграть важную роль в освещении неясных вопросов сейсмотектоники этой области.

В Ереван-Ордубадском синклинории породы андезитовой субформации охватывают интервал от олигоцена до низов плиоцена, составляя единый вулканический комплекс. Характерной чертой указанной субформации является содержание комплекса пород с повышенной щелочностью. Наиболее щелочными, по данным А. С. Остроумовой, являются лейцитовые и гаюиновые порфиры. Более широким развитием в указанной субформации пользуются эффузивы нормальной щелочности, в том числе пироксеновые, пироксен-роговообманковые андезиты. В эту толщу, известную под названием палеотипных андезитов, входят также роговообманковые биотитовые трахилипариты и трахиандезиты [8].

Испытание образцов горных пород указанной субформации производилось при давлении до 15 кбар на установке поршень-цилиндр, разработанной в Институте физики Земли АН СССР [5]. Средой, передающей давление, является пластичное твердое тело—свинец. Применялась методика, которая позволяет производить одновременное определение скоростей упругих волн и декремента объема у горных пород и, следовательно, вычислять их сжимаемость и плотность.

Основная часть установки состоит из камеры высокого давления, двух наковален и двух поршней, изготовленных из твердого сплава ВК-6 или ВК-8. Камера и наковальни спрессованы в стальные кольца—поддержки. Образец породы помещается в камеру в тонкой свинцовой оболочке. Смещение поршней измеряется в процессе опыта двумя индикаторами часового типа с ценой деления шкалы 0,001 см. Давление создается с помощью 100-тонного гидравлического пресса типа ВК-18. Скорости продольных волн в образцах определялись импульсным ультразвуковым методом на частоте 1—1,8 Мгц. В качестве пьезоэлектрических датчиков, применялась пьезокерамика ЦТС, которая монтировалась в поддерживающие кольца наковален. Ультразвуковая измерительная аппаратура состояла из генератора импульсов Г 5-15, широкополосного усилителя УШ-10 и импульсного осциллографа С1-13А и описана в работе [8]. Измерения скоростей продольных волн при нормальных условиях не выявили анизотропии скоростей упругих волн в отобранных образцах, поэтому они вырезались в произвольном направлении в виде цилиндров длиной 2 см и диаметром 1,75 см и изготовлялись с точностью до 0,002 см. Декремент объема измерялся статическим методом.

Результаты определения скорости показывают, что увеличение давления до 1 кбар приводит, как обычно, к резкому увеличению скорости  $\vartheta$  (до 30%), поскольку начинают закрываться щелеобразные поры или микротрещины [2] и улучшается акустический контакт между зернами в породе, затем степень возрастания скорости уменьшается. В области давления от 5 до 15 кбар возрастание  $\vartheta$  составляет 5—8%. Кривые зависимости скорости продольных волн от давления в андезитовых породах располагаются в интервале 3,13—4,44 км/сек при атмосферном давлении и 4,95—5,77 км/сек при 14 кбар. На рис. 1 эта область показана штриховкой.

В таблице 1 приведены значения пористости при атмосферном давлении, скорости продольных волн и плотности при некоторых давлениях до 15 кбар для всех изученных пород. Из таблицы видно, что менее пористые и более плотные образцы по значениям скорости продольных волн располагаются в верхней части заштрихованной области. Отдельными линиями на рис. 1 показаны кривые изменения  $\vartheta$  от давления для пироксенового андезита (обр. 4258), сиенита (обр. 4271), трахиандезитов (обр. 4272, 4273), липарита (обр. 4274) и липарито-дацита (обр. 4275). Кривые зависимости скорости от давления для пироксенового андезита 4258 и сиенита 4271 располагаются вне заштрихованной об-

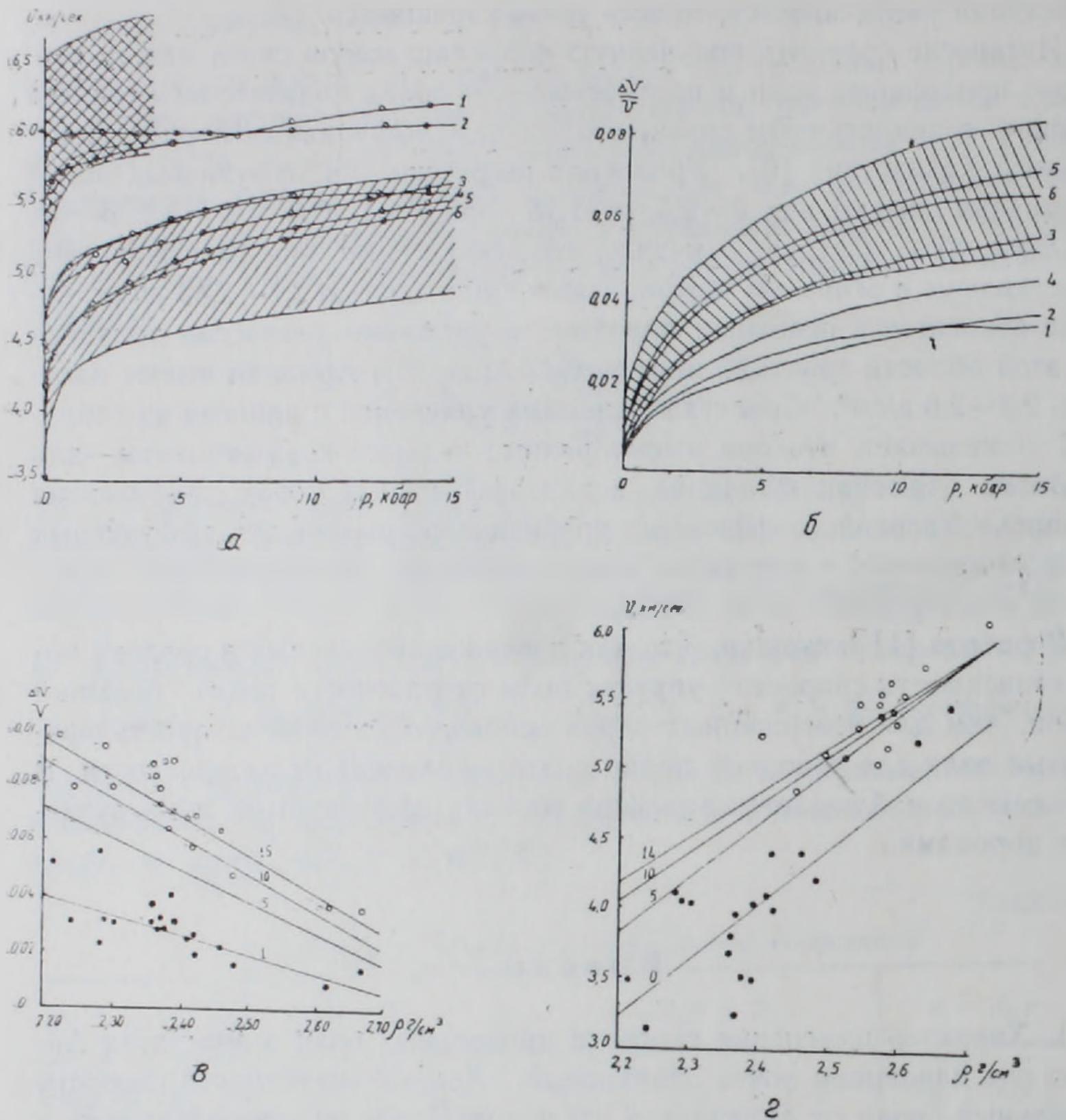


Рис. 1. Зависимость скорости упругих волн от давления: а) для горных пород андезитового состава Армении—заштрихованная область, 1—пироксеновый андезит (4258), 2—сиенит (4271), 3—4—трахиандезиты (4273 и 4272), 5—липарито-дацит (4275), 6—липарит (4274); дисритов и гранодиоритов Магнитогорского района—двойная штриховка и сиенита—пунктирная линия. б) Изменение декремента объема с давлением для андезитовых пород Армении. в) Зависимость между  $\frac{\Delta V}{V_0}$  и  $\rho$  для андезитовых пород Армении, 1, 5, 10, 15—давления в кбарах. г) Зависимость между  $v$  и  $\rho$  для андезитовых пород Армении. 0, 1, 5, 10, 15—давления в кбарах.

ласти. В этих образцах наблюдались более высокие значения скорости во всем интервале давлений. Для андезита 4258 это связано с повышенным содержанием пироксена—минерала, обладающего высокой скоростью продольных волн. Сиениты характеризуются более высокими значениями скоростей упругих волн, чем их эффузивные аналоги. Это следует и из сопоставления приведенных данных с результатами для диоритов и гранодиоритов из работ [1, 10, 12], показанных на рис. 1 двойной штриховкой. Интересно сравнить две кривые зависимости  $v$  от давления для сиенита из Армении и сиенита из Магнитогорского

Таблица 1

Плотность и скорость продольных волн для андезитовых пород Армении  
(в зависимости от давления, кбар)

№ образцов	Пористость К, %	Плотность (г/см <sup>3</sup> , при давлении, кбар)					Скорость продольных волн (км/сек) при давлении, кбар				
		0,001	1	5	10	15	0,001	1	5	10	15
<b>Андезиты</b>											
4257	1,20	2,46	2,51	2,57	2,61	2,63	4,40	5,00	5,40	5,62	5,77
4258	2,20	2,67	2,71	2,74	2,76	2,77	5,46	5,74	5,96	6,12	6,22
4259	5,80	2,42	2,48	2,54	2,58	2,59	4,00	4,80	5,00	5,16	5,35
4260	7,80	2,38	2,44	2,49	2,52	2,54	3,51	4,70	5,14	5,26	5,30
4261	8,20	2,36	2,44	2,51	2,56	2,58	3,69	4,56	4,82	5,06	5,18
4262	9,50	2,37	2,44	2,50	2,55	2,57	3,95	4,44	4,76	4,96	5,08
4263	10,50	2,39	2,46	2,52	2,55	2,58	3,47	4,50	4,96	5,40	5,65
4264	10,50	2,21	2,33	2,40	2,44	2,45	3,48	4,44	4,58	4,72	4,86
4265	11,90	2,29	2,39	2,46	2,50	2,52	4,06	4,34	4,72	5,00	5,10
4266	11,90	2,36	2,46	2,50	2,55	2,57	3,80	4,66	5,14	5,40	5,57
4267	12,40	2,39	2,45	2,52	2,56	2,57	4,02	4,88	5,06	5,28	5,42
4268	14,50	2,30	2,38	2,44	2,48	2,49	4,04	4,48	4,80	5,00	5,12
4269	14,90	2,28	2,33	2,38	2,40	2,40	4,11	4,74	4,90	5,10	5,26
4270	17,60	2,24	2,32	2,40	2,41	2,43	3,13	4,34	4,58	4,82	4,95

**Сиениты**

4271 | 0,80 | 2,62 | 2,65 | 2,69 | 2,71 | 2,72 | 5,42 | 5,96 | 6,00 | 6,08 | 6,01

**Трахиандезиты**

4272 | 8,50 | 2,48 | 2,51 | 2,56 | 2,59 | 2,60 | 4,44 | 5,06 | 5,42 | 5,52 | 5,56  
4273 | 9,00 | 2,42 | 2,47 | 2,52 | 2,56 | 2,57 | 4,40 | 4,96 | 5,26 | 5,42 | 5,46

**Липариты**

4274 | 9,40 | 2,41 | 2,48 | 2,53 | 2,57 | 2,59 | 4,10 | 4,60 | 5,06 | 5,30 | 5,44

**Липарито-дациты**

4752 | 10,90 | 2,37 | 2,44 | 2,49 | 2,54 | 2,56 | 3,23 | 4,60 | 5,10 | 5,36 | 5,50

района [12], которые имеют одинаковые значения плотности при нормальных условиях и пористости, различающейся почти в два раза. Получено хорошее совпадение данных, хотя график для сиенита из Магнитогорского р-на располагается несколько ниже из-за большей пористости образца. Графики для трахиандезитов, липарита и липарито-дацита разместились в верхней части заштрихованной области, а именно там, где кривые для андезитов с пористостью менее 10%. Эти породы, близкие к андезитам по минеральному составу, оказались подобными и по упругим и плотностным свойствам.

В процессе эксперимента определялось изменение декремента объема  $\frac{\Delta V}{V}$  угорных пород в функции давления (рис. 1). Опыты показали, что декремент объема для андезитовых пород изменяется от 0,017 до 0,037 при повышении давления до 1 кбар. Далее декремент объема для них увеличивается более чем вдвое и при 15 кбар варьирует от 0,053 до 0,085. На рис. 1 б эта область показана штриховкой; одновременно

показаны графики изменения  $\frac{\Delta V}{V_0}$  от давления для остальных исследованных горных пород. Из графика видно, что те горные породы, которые имеют высокие скорости продольных волн, располагаются здесь в нижней части, а сиенит (4258) и андезит пироксеновый (4271) имеют наименьший декремент объема, который при 15 кбар составляет 0,037. Зная изменение декремента объема и начальную плотность горной породы, можно вычислить плотность  $\rho$  при любом давлении по известной формуле

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 - \frac{\Delta V}{V_0}}, \quad (1)$$

где  $\rho_0$  — плотность при атмосферном давлении. Ввиду того, что была замечена связь между декрементом объема и начальной плотностью у горных пород, представляла интерес также корреляционная связь  $\frac{\Delta V}{V_0}$  от  $\rho_0$  при разных давлениях. Уравнение регрессии записывается в виде линейного уравнения  $\frac{\Delta V}{V_0} = A_1 \rho_0 + B_1$ , где  $A_1$  и  $B_1$  — коэффициенты, зависящие от давления. Численные значения коэффициентов  $A_1$  и  $B_1$  и коэффициента корреляции  $r$ , определенные для некоторых значений давлений, приведены в таблице 2.

Таблица 2  
Параметры регрессии и коэффициентов корреляции

P кбар	$\frac{\Delta V}{V_0} = A_1 \rho_0 + B_1$			$v = A_2 K + B_2$			$v = A_3 \rho + B_3$		
	$A_1$	$B_1$	$r_1$	$A_2$	$B_2$	$r_2$	$A_3$	$B_3$	$r_3$
0,001				-0,08	4,75	-0,58	4,03	-5,63	0,65
1	-0,07	0,195	0,75	-0,085	5,25	-0,67			
5	-0,11	0,314	0,86	-0,056	5,59	-0,68	4,01	-4,99	0,91
10	-0,13	0,374	0,84	-0,054	5,78	-0,68	3,48	-3,59	0,83
15	-0,14	0,41	-0,86	-0,053	5,88	-0,65	3,27	-3,01	0,82

Из таблицы 2 видно, что коэффициент корреляции  $r$  высокий. Найденные уравнения регрессии имеют большое практическое значение, т. к. позволяют по плотности при нормальных условиях для породы андезитового состава определить изменение декремента объема при высоком давлении, а далее, пользуясь формулой (1), определить плотность при том же давлении. Рядом авторов исследовались зависимости  $\vartheta(\rho)$  для горных пород [7]. Представляло интерес установление коррекционной связи между  $\vartheta$  и  $\rho$ , а также между  $\vartheta$  и  $K$  при разных давлениях для пород андезитового состава. Полученные значения коэффициентов  $A$ ,  $B$  и  $r$  также приведены в таблице 2. При атмосферном давлении разброс точек велик и коэффициент корреляции  $r$  мал, вероятно вследствие неоднородности и микротрещиноватости пород и т. п. При повы-

шении давления разброс точек заметно уменьшается и коэффициент корреляции увеличивается, то есть связь улучшается.

Интересно сравнить полученную корреляционную связь между скоростью продольных волн и плотностью для пород андезитового состава Армении с аналогичным соотношением для эффузивных пород Центрального Казахстана [6]. Уравнения регрессии для эффузивных пород Казахстана имеют вид  $\vartheta=2,5$ ,  $\rho=1,16$  при  $P=1$  атм и  $\vartheta=2,5$ ,  $\rho=0,6$  при  $P=4$  кбар. Следует отметить, что эффузивные породы Казахстана представлены в основном порфиритами с плотностью  $2,7-2,85$  г/см<sup>3</sup>, которые относятся к основным породам, и уравнение регрессии получено для этой области значений плотности. Андезиты Армении имеют плотность  $2,2-2,6$  г/см<sup>3</sup>. Сопоставление этих уравнений с нашими из таблицы 2 показывает, что они имеют разные угловые коэффициенты—для андезитов Армении больший, а для эффузивных пород Казахстана меньший. Угловой коэффициент уравнения регрессии для эффузивных пород не изменяется или очень мало изменяется при повышении давления от атмосферного до 4—5 кбар.

В работе [1] показано, что для изверженных кислых и средних пород зависимость скорости упругих волн от плотности имеет больший наклон, чем для изверженных пород основного состава. Скорость продольных волн для основных пород почти не зависит от их плотности. В этом смысле наблюдается аналогия между эффузивными и интрузивными породами.

### В ы в о д ы

1. Характер изменения скорости продольных волн в андезитах Армении под давлением почти одинаковый. Кривые зависимости скорости продольных волн от давления в изученных породах располагаются в довольно узкой области, в интервале  $3,13-4,44$  км/сек при атмосферном давлении и  $4,95-5,77$  км/сек при 15 кбар. Эта область для эффузивных андезитов ниже, чем область для их интрузивных аналогов—диоритов и гранодиоритов.

2. Изменение объема больше у тех андезитов, которые имеют меньшее значение плотности и наоборот.

3. Замечена зависимость между скоростью продольных волн, плотностью и пористостью для пород андезитового состава и установлена корреляционная связь между этими параметрами.

Институт физики Земли Академии наук СССР,

Ереванский политехнический институт

Поступила 20.III.1977.

Մ. Պ. ՎՈԼԱՐՈՎԻՉ, Գ. Շ. ՇԱՀԻՆՅԱՆ, Ե. Ի. ԲԱՅՈՒԿ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱՆԴԵՋԻՏԱՅԻՆ ԱՊԱՐՆԵՐԻ ԽՏՈՒԹՅՈՒՆԸ ԵՎ  
ԱՐԱԳՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԲՆՈՒԹԱԳՐՈՒՄԸ ԲԱՐՁՐ ՃՆՇՄԱՆ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ

Ա մ փ ո փ ու մ

Ապարների ֆիզիկական հատկությունների ուսումնասիրությունը բարձր ճնշման պայմաններում կարևոր նշանակություն ունի խորքային խզումների զարգացման պատմությունը բացահայտելու համար:

Երևան-Օրդուբադի խորքային խզման զոնայից վերցված փորձանմուշները հիմնականում ներկայացված են անդեզիտներով, տրախիանդեզիտներով, սիենիտներով և լիպարիտներով: Նորմալ պայմաններում որոշված է ապարների խտությունը, ծակոտկենությունը և նրանց մեջ առաձգական ալիքների տարածման արագությունը:

Որոշված է երկայնակի ալիքների տարածման արագության աճը, այդ մեծության տեղադրման տիրույթները, ծավալի և խտության փոփոխությունը 0—15 կբ ճնշման սահմաններում: Որոշված է այդ մեծությունների միջև համահարաբերակցական կապը: Ստացված տվյալները համեմատվում են Ղազախստանի նույնատիպ ապարների վերաբերյալ եղած նյութերի հետ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Баяк Е. И., Воларович М. П., Скворцова Л. С. Скорость упругих волн при высоких давлениях в изверженных и метаморфических породах различных регионов. Тектонофизика и механические свойства горных пород. «Наука», 1971.
2. Баяк Е. И. Скорости упругих волн в образцах изверженных и метаморфических пород при давлениях до 4000 кг/см<sup>2</sup>. Сб. «Электрические и механические свойства горных пород при высоких давлениях», М., «Наука», 1966.
3. Варданянц Л. А. Землетрясения Кавказа и его глубинное строение. Изд-во Всесоюз. географ. общества, № 2, 1946.
4. Воларович М. П. Семинар по физическим свойствам горных пород при высоких давлениях. Вестник АН СССР, № 8, 1962.
5. Воларович М. П., Левыкин А. И., Галдин Н. Е. Изучение скоростей продольных волн в образцах горных пород при давлениях до 20000 кг/см<sup>2</sup>. Докл. АН СССР, т. 157, № 6, 1964.
6. Воларович М. П., Курские А. К., Томашевская И. С., Уразаев Б. М. Скорости продольных волн при высоких всесторонних давлениях в образцах метаморфических, эффузивных и осадочных пород центрального Казахстана. Сб. «Электрические и механические свойства горных пород при высоких давлениях». «Наука», М., 1966.
7. Воларович М. П., Киреснкова С. М., Баяк Е. И. Исследование скоростей продольных волн и плотности эклогитов при давлениях до 17 кбар. Известия АН СССР, серия геол., № 7, 1971.
8. Воларович М. П., Баяк Е. И., Левыкин А. И., Томашевская И. С. Физико-механические свойства горных пород и минералов при высоких давлениях. «Наука», 1974.
9. Воларович М. П., Левыкин А. И., Арутюнян А. В. Скорости упругих волн в образцах горных пород из сфиолитовых интрузий Армении при давлениях до 20 кбар. В сб. «Физические свойства горных пород при высоких давлениях и температурах», Тбилиси, 1974.

10. Звягинцев Л. И., Баяк Е. И. Исследование при высоких давлениях скоростей продольных волн в горных породах, отобранных по профилю ГСЗ Грозный-Дашкесан на Кавказе. Известия АН СССР, сер. геол., № 3, 1969.
11. Магницкий В. А. Внутреннее строение и физика Земли. «Недра», 1965.
12. Овчинников Л. Н., Воларович М. П., Баяк Е. И., Баранов Б. В. Некоторые физические свойства гранитоидов Магнитогорского рудного района на Урале. В сб. «Экспериментальные исследования процессов минералообразования». «Наука», 1970.
13. Пейве А. В. Разломы и их роль в строении и развитии земной коры. В сб. «Структура земной коры и деформации горных пород». Изд-во АН СССР. 1960.