

Член-корреспондент АН СССР Г. Д. АФАНАСЬЕВ, Е. И. БАЮК,

ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТЕЙ УПРУГИХ ВОЛН
НЕКОТОРЫХ ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛОВ
ПРИ ДАВЛЕНИЯХ ДО 20 КИЛОБАР

Имеется значительное число работ по исследованиям скоростей волн и других упругих параметров горных пород при атмосферном и высоких давлениях (см., например, ⁽¹⁻³⁾); ряд работ ⁽³⁻¹¹⁾ посвящен изменению скоростей в породах при высоких давлениях; что касается упругости породообразующих минералов, то сводки приведены в ^(1-3, 12). Изучение скоростей упругих волн в минералах при высоких давлениях только начинается: из числа новых публикаций могут быть названы ^(1, 3, 6, 8, 13, 14).

Как показывает опыт, существенное влияние на скорость распространения упругих волн в горных породах оказывает их поровое пространство (ср., например, туф, пензы с липаритами и гранитами). В сильно пористых породах, в частности, и в базальтах, скорость продольных волн падает до 2—3 км/сек.

Полное поровое пространство в горной породе состоит, по-видимому, из поровых полостей двух типов: 1) макро- и микротрещины в породе и составляющих ее минералах, полости на границах зерен; 2) ультрамикropоры или поры кристаллизации, заполненные газовыми или жидкими пузырьками. Сюда же относятся различные дефекты кристаллической решетки минералов, а также нарушения в строении кристаллов, вызванные процессами типа распада твердого раствора (например, в полевых шпатах), двойникование, наложение стресса с развитием волосовидных трещинок. При всестороннем сжатии 0,5—1 кбар первый тип поровых полостей в значительной мере аннулируется (закрывается). Межзерновая пористость и ультрапористость второго типа, по-видимому, обычно не полностью учитывается при прямом определении пористости.

Поскольку любая изверженная горная порода, кристаллизуясь, образует агрегат зерен с трудно учитываемым полным поровым пространством, возникла необходимость исследовать упругие свойства отдельных минералов, составляющих кристаллическую породу, так как для них практически исключается влияние межзерновой пористости. В настоящей работе приведены данные для некоторых минералов при квазигидростатических давлениях, полученных с помощью аппаратуры, описанной ранее (⁹). Определения других свойств производились в лаборатории ИГЕМ.

Подбор материала для таких опытов особо сложен, так как здесь требуются свежие (невыветрелые) монокристаллы значительных размеров, получение которых связано с большими затруднениями. Непреодолимой трудностью оказалось, в частности, получение экспериментальных цилиндров из слюд (биотит, мусковит), так как при высверливании они расщеплялись на массу тончайших пластинок по совершенной спайности (001).

Результаты измерений приведены в табл. 1. При давлении в 1 атм только у олигоклаза (Карелия) и микроклина в плоскости, перпендикулярной (100), v_p ниже 5 км/сек. В среднем из трех измерений для олигоклазов при атмосферном давлении $v_p = 5,02$ км/сек. Для остальных породообразующих минералов в измеренных сечениях средние для каждого

Зависимость $v_P(P)$ в монокристаллах породообразующих минералов при всестороннем сжатии

Минерал; место взятия	Кристаллогр. направление вырезанного цилиндра	Объемн. вес (плотность), г/см ³	Пористость эффе- ктив- ная, %	P, кбар							
				0,001	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0	15,0	20,0
Кварц	опт. оси	(2,65)		6,36	6,37	6,39	6,41	6,47	6,55	6,63	6,71
Олигоклаз (Ап 29), Карелия, Черная Салма	⊥ опт. оси ⊥ (001)	2,64	0,90	5,78 5,57 2,73	5,82 7,08	5,85 7,40	5,89 7,60	5,98 7,96	6,10 8,14	6,21 8,27	6,30 8,43
То же v_s								3,06	3,14	3,24	3,31
Олигоклаз-Беломо- рит	⊥ (001) ⊥ (010)	2,65	0,62	4,41* 5,08	7,74 6,30	7,85 6,84	7,95 7,05	8,16 7,44	8,27 7,77	8,37 8,04	8,46 8,27
Анортоклаз, р. Чу То же. Н. Е. Галдин	(010) ⊥ (001)	2,566	0,79	7,30 6,70	7,55 7,00	7,70 7,30	7,93 7,43	8,25 7,60	8,35 7,67	8,40 7,70	8,45 7,70
Лабрадор-порфирит, вкрапленный из анортозита Украин- ны	без точной ориентиров- ки с участ- ками поро- ды	2,88	0,40	6,55	6,65	6,71	6,76	6,85	6,90	6,99	—
Нефелин, Урал, Вишневые горы	⊥ (1000)	2,60		6,67	6,90	7,20	7,45	7,80	8,25	8,65	
Нефелин (*)	⊥ (0001)	2,585		5,50	5,60	5,62	5,65	5,70	(5,75)**		
»	⊥ (0001)	2,585		6,85	6,90	7,05	7,30	7,40	(7,45)*		
Микроклин (*)	[010] ⊥ (010)	2,60	0,62	7,30 5,40	7,70 6,10	7,90 6,18	8,15 6,22	8,28 6,25	8,40* 6,30		
Микроклин (*)	⊥ (001) [010] ⊥ (100)	2,571 2,570 2,571	0,62	6,43*** 7,67 4,65	7,22 8,18 5,11	7,43 8,25 5,18	7,53 8,29 5,22	7,59 8,35 5,30	7,62 8,45 5,38		

* Трещины.

** Значение v_P при $P = 8$ кбар.*** В работе (*) начальное давление $P_0 = 0,01$ кбар.

минерала значения v_P были от 6 до 6,5 км/сек. При давлении 0,5 кбар для олигоклаза заметно резкое (на 40%) увеличение v_P . Средняя v_P из трех измерений в двух монокристаллах при 0,5 кб равна 7,04 км/сек. При таком давлении среднее значение v_P для кварца 6,22 км/сек, 7,85 км/сек для плагиоклаза и 7,42 км/сек для калий-натриевого полевого шпата. При давлении в 10 кбар среднее значение v_P для кварца 6,42 км/сек, плагиоклаза 8,06 км/сек и К — На-полевого шпата 7,50 км/сек. Скорости, полученные Томашевской для микроклина (*), хорошо сопоставимы с данными Симмонса (*).

Обращает на себя внимание значительная пористость в кристаллах олигоклаза (0,91%). Этим, в основном объясняется резкое (на 20%) увеличение скорости продольных волн в олигоклазе на этапе сжатия до 0,5 кбар. На этом этапе закрывается большая часть объема порового пространства первого типа.

Для олигоклаза из Карелии были определены также скорости двух поперечных волн v_s , колебания в которых взаимно перпендикулярны. Поскольку они оказались весьма близкими, то в табл. 1 приведены средние их значения, для которых обнаруживается меньшая степень возрастания с давлением, чем у продольных волн того же направления распространения.

Таблица 2
Изменение анизотропии скоростей в монокристаллах

Минерал	Сравниваемые направления	$\frac{100 [v_P - v_P(\text{min})]}{v_P(\text{min})}$		
		0,5 кбар	2 кбар	10 кбар
Кварц	и ⊥ опт. оси	9,4	8,2	7,3
Олигоклаз	⊥ (001) и ⊥ (010)	23,0	9,6	6,4
Микроклин	⊥ (001) и ⊥ (100)	41,8	43,2	41,6
Анортоклаз	(010) и ⊥ (001)	7,8	8,5	8,2

Таблица 3

Зависимость $v_P(P)$ для некоторых рудных и нерудных минералов

Минерал, место взятия	Объемный вес, г/см ³	P, кбар						
		0,001	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0	15,0
Пирит* (монокристалл), ⊥ грани куба	4,99	8,02		8,21	8,36	8,66	8,80	9,02
Каменная соль поликристаллическая, Припятская впадина	2,10	4,50	4,54	4,56	4,62			
Ангидрит (превращенный в гипс)	2,90	4,40		4,93		5,37	5,51	5,63
Ангидрит ⁽⁵⁾	2,928	4,80		6,00	6,06	6,17	6,27	
Магнетитовая руда ⁽⁵⁾	4,76	4,20		6,60	6,70	6,84	6,94	
Гематит ⁽⁵⁾	5,00	7,10		7,72	7,73	7,75	7,80	
Гранат (гроссуляр) ⁽⁵⁾	3,561	6,30		8,41	8,55	8,77	8,99	
Гранат (альмандин-пироп) ⁽⁵⁾	3,950	5,90		7,81	7,91	8,00	8,07	

* Эффективная пористость пирита 0,62 %.

Данные табл. 1 показывают также заметную анизотропию скоростей, различную для разных минералов, но в общем сохраняющуюся с повышением давления (табл. 2).

Резкое различие скоростей продольных волн наблюдается лишь у микроклина. По данным ⁽⁶⁾ в цилиндре микроклина, вырезанном ⊥ (001), v_P на 40 % выше, чем в цилиндре, вырезанном ⊥ (100), и остается таковой в диапазоне от 0,5 до 10 кбар. Такая анизотропия вряд ли может быть объяснена только строением кристаллической решетки, скорее здесь сказывается влияние пертитовых вростков альбита, расположенных в плоскости пинакоида (100). Перритообразование, как результат распада твердого раствора Ab — Ort ведет, по-видимому, к известному разрыхлению структуры кристалла в направлении ⊥ (100).

В табл. 1 приведены также данные для лабрадора из анортозитов Украины. Для него характерны средние скорости, мало увеличивающиеся с возрастанием давления. Повышение скорости v_P при давлении в 15 кбар по сравнению со значением при атмосферном давлении достигает всего 6,7 %, причем это увеличение происходит весьма равномерно на всем диапазоне давлений. Такое изменение скоростей с давлением обусловлено отсутствием в породе следов выветривания. Относительно небольшое значение v_P , приближающееся к 7 км/сек для давления в 15 кбар, обусловлено тем, что вырезанный цилиндр помимо лабрадора включал и вмещающую породу. Работы с монокристаллами плагиоклаза, имеющими разное содержание анортитовой молекулы, необходимо продолжать.

Помимо породообразующих минералов были исследованы некоторые минералы из месторождений полезных ископаемых (табл. 3). Для цилиндра из монокристалла пирита, высверленного ⊥ грани куба, характерна высокая начальная скорость (8,02 км/сек при атмосферном давлении), которая, постепенно нарастая, достигает при 10 кбар значения 8,80 км/сек, а при 15 кбар — значения 9,02 км/сек. Для агрегатов магнетита и гематита при объемном весе, близком к объемному весу пирита, получены значительно меньшие скорости продольных волн при сжатии в диапазоне 0,01 — 10 кбар (табл. 3). Для гранатов ⁽⁵⁾ определены высокие значения v_P лишь от 1 кбар. В ⁽⁵⁾, к сожалению, отсутствуют сведения о пористости исследованных материалов, хотя, как было показано выше, объем полного порового пространства в исследуемом материале оказывает существенное влияние на скорости упругих волн в твердой среде.

Авторам представляется, что результаты исследований, приведенные в настоящей статье, следует принимать во внимание при геологической интерпретации геофизических данных, получаемых методом глубинного сейсмического зондирования.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта
Академии наук СССР
Институт геологии рудных месторождений,
петрографии, минералогии и геохимии
Академии наук СССР
Москва

Поступило
10 VIII 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Справочник физических констант горных пород, М., 1969. ² Б. П. Беликов, К. С. Александров, Т. В. Рыжова, Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород, «Наука», 1970. ³ O. L. Anderson, R. C. Libermann, Sound Velocities in Rocks and Minerals. Experimental Method, Extrapolation to very High Pressures and Results. Lamont Geol. Observatory Contrib. № 1062, 1970. ⁴ М. П. Воларович, Геология и геофизика, № 4 (1964). ⁵ F. J. Birch, Geophys. Res., 65, № 4 (1960); 66, № 7 (1961). ⁶ G. Simmons, J. Geophys. Res., 69, № 6 (1964). ⁷ Г. Д. Афанасьев и др., Изв. АН СССР, сер. геол., № 9 (1965). ⁸ Сборн. Физико-механические свойства горных пород верхней части земной коры, «Наука», 1968. ⁹ М. П. Воларович, А. И. Левыкин, ДАН, № 6 (1965). ¹⁰ Сборн. Тектонофизика и механические свойства горных пород, «Наука» (1971). ¹¹ Т. С. Лебедев, В. И. Шаповал, В. А. Корчин, Исследование воздействия высоких температур и давлений на изменение скорости в изверженных и метаморфических горных породах, Геофиз. сборн., в. 31, 32, Киев, 1969. ¹² G. Simmons, J. Graduate Res. Center, 34, № 1—2 (1965). ¹³ N. J. Maskimin, P. Andreath, R. N. Thurston, J. Appl. Phys., 36, № 5 (1965). ¹⁴ Г. Д. Афанасьев, Изв. АН СССР, сер. геол., № 11 (1970).