

© И.Б.Сафаров, 2006

## ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОРОВЫХ И МАНТИЙНЫХ ЭКЛОГИТОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ И ИХ ПОЛОЖЕНИЕ В ЛИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

И.Б.Сафаров

*Институт геологии НАН Азербайджана  
AZ1143, Баку, просп. Г.Джавида, 29А*

Петрофизические характеристики коровых и мантийных эклогитов определены на модифицированной твердофазной установке высокого квазигидростатического давления импульсным ультразвуковым методом. Из полученных данных видно, что область изменения физических параметров для всех групп эклогитов довольно широка. Это объясняется вариацией соотношения породообразующих минералов и частичной измененностью образцов вторичными процессами. Установлено, что физические параметры коровых эклогитов из метаморфических комплексов Кокчетавского массива, Урала и Тянь-Шаня соответствуют сейсмическим характеристикам корово-мантийной смеси континентальной коры. Средние значения физических параметров, измеренных в образцах мантийных эклогитов из кимберлитовых трубок взрыва Якутии и Памира, соответствуют сейсмическим характеристикам подкорового слоя нормальной верхней мантии континентов.

### Введение

За последние годы мало изучены физические свойства ксенолитов и главных породообразующих минералов глубинных включений в различных интервалах высоких давлений и температур, и проведение этих исследований является актуальной задачей (Волярович, Киреевкова 1971; Волярович и др., 1981а; Волярович и др., 1981б; Галдин, 1977; Сафаров, 2003). Это связано с тем, что выше-названные исследования совместно с результатами петрологических, геохимических и геофизических исследований дают более точное представление о составе и строении земной коры и верхней мантии в изучаемом районе, а также позволяют объяснить природу процессов, происходящих в коре, верхней мантии и подстилающей ее астеносфере (Геншафт, 1974; Соболев и др., 1975; Кимберлиты и ..., 1990; Лутц, 1975; Рингвуд, 1981). Исследования глубинных пород при высоких термодинамических условиях показали, что нижние части консолидированной коры и верхняя мантия сложены в ряде регионов метаморфическими породами (Киреевкова, Сафаров, 1988; Сафаров, 2003). Небольшого числа появившихся в литературе работ пока недостаточно для того, чтобы дать более полную и конкретную интерпретацию имеющихся данных. Для этого необходимы сведения о физических параметрах глубинных пород, в

частности пород эклогитовой фации, при высоких термодинамических условиях.

В данной работе сделана попытка на основании обобщения имеющихся в распоряжении автора материалов по физическим свойствам эклогитов при высоких термодинамических условиях раскрыть особенности эклогитов метаморфических комплексов и в результате сравнительного анализа с таковыми мантийных комплексов выявить их характерные отличия. Особое внимание было уделено положению в литосфере Земли найденных в вулканических породах ксенолитов глубинного происхождения. Эксперименты проводились на твердофазной установке высокого давления типа цилиндр-поршень по методике, разработанной ранее (Сафаров, Левыкин, 1992).

### Результаты и их обсуждение

С проблемой эклогитов связано решение многих геолого-геофизических задач, таких как определение состава и строения глубинных зон Земли, исследование эволюции глубинного магматизма и регионального метаморфизма, условий высокобарических минеральных парагенезисов, физико-механических особенностей глубинных пород и др. Эклогиты по химическому составу подразделяются на троктолитовые и базальтовые типы. Критериями для их выделения являются магнезиальность, содержание  $TiO_2$  и щелочность.

Эклогиты троктолитового типа богаты глиноземом и по химическому составу сопоставимы с габброидами офиолитовых ассоциаций, а также с некоторыми эвкритами, в то время как эклогиты базальтового типа по составу близки к различным базальтам (Удовкина, 1985). По петрологическим свойствам породы эклогитовой фации подразделяются на коровые и мантийные эклогиты. Условия их метаморфизма и состав слагающих минералов оказываются резко отличными (Лутц, 1975; Удовкина, 1985; Кушев, Виноградов, 1978).

Коровые разновидности эклогитов содержат гранат альмандинового состава и моноклинный пироксен с большой примесью жадеитового компонента, нередко присутствуют также водосодержащие минералы – роговые обманки и слюды. Формирование коровых эклогитов происходило в условиях низких температур и весьма умеренных давлений (Удовкина, 1985). Нередко они оказываются по условиям метаморфизма близкими к породам амфиболитовой и зеленосланцевой фаций, с которыми тесно ассоциируют. Среди коровых эклогитов выделяется офиолитовый тип эклогитов с глаукофаном, приуроченный к зонам глубинных разломов, так называемым офиолитовым поясам, ассоциирующим с глаукофановыми сланцами, жадеитовыми и зеленосланцевыми породами (Кушев, Виноградов, 1978; Удовкина, 1985).

Мантийные эклогиты содержат гранатпироп и диопсидовый пироксен. В них отсутствуют водосодержащие минералы. Они широко известны как ксенолиты глубинных выбросов кимберлитовых и базальтовых трубков взрыва. Сформировались мантийные эклогиты в условиях высоких температур и давлений (Лутц, 1975).

Экспериментальные данные о скоростях распространения упругих волн в породах эклогитовой фации малочисленны. При этом большинство результатов получено для продольной волны и при небольших давлениях. Нами изучены при давлениях 2,5-3,0 ГПа скорости продольных –  $V_p$  и поперечных –  $V_s$  волн, а также плотности в образцах коровых эклогитов Урала, Казахстана, Тянь-Шаня и мантийных эклогитов Сибирской платформы и Памира.

**Коровые эклогиты Казахстана.** Области проявления коровых эклогитов Казахстана сосредоточены в Кокчетавской глыбе

или, согласно некоторым исследованиям, в Кокчетавском антиклинории. Коровые эклогиты и их измененные разновидности в Северном Казахстане встречаются только среди пород двух нижних (берлыкской и жолдыбайской) свит зерендинской серии (Кушев, Виноградов, 1978; Удовкина, 1985).

Главные минералы коровых эклогитов Кокчетавского массива – гранат, пироксен, кварц, рутил; из вторичных присутствуют амфибол, цоизит и слюда; из акцессорных часто встречается апатит. Гранаты – преимущественно альмандинового состава, а моноклинный пироксен – с большой примесью жадеитового компонента. Условия образования эклогитов Северного Казахстана различными исследователями оцениваются по-разному, формирование их происходило при  $T=600-800^{\circ}\text{C}$ ;  $P=1,0-1,5$  ГПа. По химическому составу эклогиты Кокчетавского массива относятся к базальтовому типу. Среди них выделяются железистые и высокожелезистые разновидности. В целом коровые эклогиты Кокчетавского массива – преимущественно альмандиновые эклогиты с типичным омфацитом, ассоциирующиеся с метаморфическими породами средних и низких ступеней метаморфизма (Кушев, Виноградов, 1978).

Коровые эклогиты Кокчетавского массива (обр.3622,3623,3624) имеют очень высокие плотности, которые при атмосферном давлении меняются от 3,30 до 3,40 г/см<sup>3</sup>. Приращение плотности с давлением до 2,5-3,0 ГПа для коровых эклогитов составляет 4-5%.

При атмосферных и высоких давлениях для коровых эклогитов Кокчетавского массива скорости продольных и поперечных волн варьируют в больших пределах (табл.1). Такой значительный разброс скоростей упругих волн в коровых эклогитах при высоких давлениях указывает на наличие у данных пород структурных неоднородностей. Исследование шлифов показало, что имеющееся расхождение скоростей упругих волн является результатом неравномерного скопления разнозернистого граната в породе. Поэтому в зависимости от содержания альмандинового граната, а также по величинам скоростей упругих волн коровые эклогиты разделены на три группы. В первую группу входят образцы, в которых содержится до 65-75% граната. Высокие скорости упругих волн наблюдаются в образцах этой группы и

при давлении 1,5-2,0 ГПа достигают величин: 8,0-8,30 км/с – для продольных волн и 4,50-4,65 км/с – для поперечных волн. В указанных интервалах давлений низкие скорости упругих волн получены для образцов второй группы (гранат~25-30%). Для этих образцов скорости упругих волн при том же давлении меняются от 7,20 до 7,50 км/с для продольных волн и от 4,10 до 4,30 км/с – для поперечных волн. А что касается образцов третьей группы (гранат~45-50%), то там скорости упругих волн варьируют от 7,50 до 8,0 км/с для продольных волн и 4,30-4,50 км/с для поперечных волн при давлении 1,5-2,0 ГПа (табл.1).

На рис. 1а приведены зависимости скоростей упругих волн при давлении до 2,5 ГПа для образцов корового эклогита Кокчетавского массива. Как видно, среди представленных коровых эклогитов самыми высокими значениями скоростей продольных и поперечных волн при давлениях до 2,0 ГПа характеризуются образцы первой группы (содержание граната до 75%), которые на графиках занимают крайнее верхнее положение. Некоторое промежуточное положение среди исследованных эклогитов занимают образцы третьей группы (содержание граната до 50%). Относительно низкие скорости продольных и поперечных волн при высоких давлениях до 2,0 ГПа наблюдаются в образцах второй группы (содержание граната~25%), которые на графиках занимают крайние нижние положения.

Следует отметить, что для образцов корового эклогита Кокчетавского массива зависимости скоростей упругих волн при высоких давлениях до 2,5-3,0 ГПа носят различный характер: в интервале давлений от 0,001 до 0,5 ГПа для всех образцов прослеживается резкое увеличение скоростей упругих волн, и приращение скоростей составляет 35-40%. Такое резкое увеличение скоростей в этом интервале давлений объясняется закрытием микротрещин, щелевых пор и межзерновым уплотнением, являющимся характерным для эклогитовых пород, а потом в интервале давлений от 0,5 до 1,5 ГПа наблюдается монотонное возрастание скоростей продольных и поперечных волн. Далее вплоть до максимального давления 2,5-3,0 ГПа зависимость скоростей упругих волн от давления резко увеличивается (табл.1). Согласно нашим исследованиям шлифов до и после опытов (Са-

фаров, 2003), при давлении от 1,3 до 3,0 ГПа составы гранатов коровых эклогитов меняются от преимущественно альмандинового (Пир<sub>26</sub>-Альм<sub>46</sub>-Гросс<sub>28</sub>) до пиропового (Пир<sub>50</sub>-Альм<sub>22</sub>-Гросс<sub>28</sub>) соответственно, а содержание гроссулярного компонента в альмандиновых гранатах не меняется. Как известно, скорости упругих волн повышаются в ряду альмандин-гроссуляр-пироп. Поэтому причиной резкого увеличения скоростей упругих волн в образцах эклогитов после 1,3-1,5 ГПа, вероятнее всего, является переход минерала граната от альмандиновой к пироповой разновидности.

**Коровые эклогиты Урала.** Коровые эклогиты Урала офиолитового типа образуют линзы, будины, пластообразные и мелкие жиллоподобные тела, секущие эклогиты более ранней генерации (Удовкина, 1985).

Большинство тел эклогитов залегают в гранатосодержащих слюдисто-кварцевых сланцах, иногда содержащих графит. Обычно метаморфические эклогиты Урала изменены: хлоритизированы, окварцованы, мусковитизированы и глаукофанизированы до образования кварц-альмандин-гранатовых пород и глаукофановых сланцев ± фенгит. В измененных эклогитах наблюдаются футлярообразные гранаты с включениями мусковита, глаукофана и пироксена (диопсид-жадеит и хлормеланит). Гранаты в эклогитах этого комплекса имеют зональное строение. Зональность гранатов может быть прогрессивной и регрессивной. В первом случае от центра к краю зерен растет содержание Mg, во втором – Fe и Mn. Пироксены также обнаруживают зональное строение. Более поздние пироксены богаче жадеитовым и акмитовым компонентами. По химическому составу эклогиты Урала принадлежат к базальтовому типу. Среди них выделяются железистые и высокожелезистые разновидности, хорошо различающиеся по содержанию TiO<sub>2</sub>. Глаукофанизированные эклогиты отличаются повышенным содержанием Na и SiO<sub>2</sub>. Все изложенное свидетельствует о том, что эклогиты Урала образовались, вероятно, при кристаллизации магмы базальтового состава в условиях p~1,5 ГПа и T=800°C. Присутствие более ранней, чем глаукофан роговой обманки свидетельствует о том, что процесс глаукофанизации – наложенный и ему предшествовала амфиболитизация эклогитов (Удовкина, 1985).

Таблица 1

Скорости продольных ( $V_p$ ), поперечных ( $V_s$ ) волн и плотность ( $\rho$ ) коровых эклогитов при различных давлениях

Порода, номер образца и место отбора	Параметры $V_p, V_s,$ (км/с), $\rho$ (г/см <sup>3</sup> )	Давление, ГПа						
		0,001	0,1	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Эклогит (Тянь - Шань) -940-3	$V_p$	6,10	6,52	6,67	6,78	6,87	6,92	7,14
	$V_s$	3,48	3,69	3,78	3,84	3,90	3,94	4,01
	$\rho$	2,65	2,69	2,70	2,71	2,73	2,76	2,78
„-----“, - 940-2	$V_p$	4,52	4,98	5,40	5,74	5,87	6,14	6,30
	$V_s$	3,02	3,28	3,39	3,45	3,53	3,62	3,69
	$\rho$	2,56	2,57	2,60	2,63	2,65	2,68	2,71
„-----“, - 940-1	$V_p$	5,13	6,56	6,86	7,20	7,42	7,53	7,69
	$V_s$	3,32	3,85	3,94	4,05	4,17	4,20	4,24
	$\rho$	2,76	2,78	2,81	2,82	2,84	2,86	2,87
Эклогит (Урал)-8420-1	$V_p$	5,43	6,86	7,40	7,64	7,86	8,12	-
	$V_s$	3,58	4,24	4,30	4,38	4,48	4,61	-
	$\rho$	3,16	3,17	3,20	3,22	3,24	3,26	-
„-----“, - 8420-2	$V_p$	4,73	6,80	7,09	7,24	7,54	7,90	-
	$V_s$	3,48	3,80	4,04	4,04	4,10	4,22	-
	$\rho$	3,30	3,32	3,34	3,38	3,41	3,43	-
Эклогит глаукофанизи- рованный - 411-1	$V_p$	6,07	7,20	7,31	7,40	7,60	7,80	-
	$V_s$	3,69	4,30	4,41	4,43	4,45	4,49	-
	$\rho$	3,29	3,30	3,32	3,36	3,40	3,42	-
„-----“, - 411-2	$V_p$	5,70	7,02	7,14	7,23	7,40	7,52	-
	$V_s$	3,57	3,76	3,85	3,90	3,95	4,01	-
	$\rho$	3,28	3,29	3,30	3,33	3,36	3,39	-
Эклогит порфироклас- тический - 311 в-2	$V_p$	6,02	7,70	7,92	8,03	8,20	8,35	-
	$V_s$	3,85	4,52	4,72	4,80	4,90	4,95	-
	$\rho$	3,47	3,48	3,50	3,53	3,56	3,60	-
„-----“, - 311в-1	$V_p$	7,06	7,40	7,52	7,80	8,08	8,22	-
	$V_s$	3,87	4,64	4,83	4,89	4,93	5,02	-
	$\rho$	3,27	3,28	3,30	3,34	3,38	3,40	-

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Эклогит (Кокчетавский массив) - 3622-1	$V_p$	6,19	7,10	7,27	7,70	8,02	8,28	8,30*
	$V_s$	4,05	4,25	4,32	4,38	4,44	4,48	4,52
	$\rho$	3,45	3,46	3,55	3,57	3,58	3,61	3,62
„-----„ - 3622-3	$V_p$	6,74	7,11	7,40	7,46	7,50	7,60	7,70
	$V_s$	4,21	4,30	4,34	4,33	4,32	4,32	4,37
	$\rho$	3,39	3,42	3,44	3,47	3,48	3,51	3,52
„-----„ - 3622-2	$V_p$	6,59	6,70	7,12	7,23	7,40	7,55	-
	$V_s$	3,85	4,02	4,15	4,18	4,25	4,32	-
	$\rho$	3,33	3,36	3,37	3,38	3,38	3,38	-
„-----„ - 3623-2	$V_p$	6,65	6,70	7,02	7,10	7,20	7,33	-
	$V_s$	3,95	4,01	4,08	4,11	4,13	4,15	-
	$\rho$	3,30	3,31	3,32	3,34	3,35	3,37	-
„-----„ - 3623-3	$V_p$	6,70	6,84	7,08	7,16	7,32	7,37	-
	$V_s$	4,02	4,12	4,15	4,19	4,22	4,26	-
	$\rho$	3,30	3,31	3,32	3,33	3,37	3,37	-
„-----„ - 3623-1	$V_p$	6,70	6,86	7,08	7,30	7,50	7,58	-
	$V_s$	4,00	4,13	4,18	4,24	4,32	4,38	-
	$\rho$	3,34	3,35	3,37	3,39	3,39	3,39	-
„-----„ - 3624-1	$V_p$	6,14	7,00	7,33	7,64	7,96	8,26	8,40*
	$V_s$	4,09	4,53	4,54	4,58	4,63	4,68	4,72
	$\rho$	3,34	3,37	3,38	3,41	3,43	3,46	3,46
„-----„ - 3624-2	$V_p$	6,15	6,90	7,38	7,88	8,10	8,20	8,32*
	$V_s$	3,80	4,10	4,25	4,33	4,46	4,51	4,62
	$\rho$	3,35	3,37	3,38	3,39	3,40	3,40	3,42
„-----„ - 3624-3	$V_p$	6,31	6,60	7,80	7,90	8,00	8,10	8,27*
	$V_s$	3,93	4,05	4,56	4,52	4,56	4,58	4,75
	$\rho$	3,43	3,46	3,46	3,48	3,51	3,52	3,52

\*При P=3,0 ГПа

Нами были проведены исследования, которые дали возможность установить пределы значений скоростей упругих волн и плотность при высоких термодинамических условиях для трех групп метаморфических коро-

вых эклогитов офиолитового типа и в то же время проследить, как изменение состава в процессе метаморфизма влияет на физические свойства этих пород.

Наиболее распространенными являются породы третьей группы - глаукофанизированные эклогиты (обр.411-1; 411-2), которые состоят из крупных хорошо ограненных зерен граната (20-30%), глаукофана (10-45%), кварца (10-15%), мусковита (3-4%), остальное составляет клинопироксен (30-50%). Породы – трещиноватые, заполнены кварцем и кальцитом. Плотности этих эклогитов – 3,25-3,29 г/см<sup>3</sup> при атмосферном давлении и 3,39-3,42 г/см<sup>3</sup> при 2,0 ГПа. Несмотря на то, что плотности этих образцов при атмосферном и высоком давлении мало отличаются, различие в скоростях упругих волн намного больше, что связано с содержанием в составе породы минерала глаукофана. С увеличением содержания глаукофана в породах скорости упругих волн уменьшаются значительно больше. Значения скорости упругих волн образца эклогита 411-1, в составе которого содержится 10-15% глаукофана, более высокие и составляют  $V_p = 6,07$  км/с;  $V_s = 3,69$  км/с при атмосферном давлении и  $V_p = 7,80$  км/с;  $V_s = 4,49$  км/с при 2,0 ГПа, а образца эклогита 411-2 с содержанием глаукофана 30-45% – 5,70 км/с; 3,50 км/с и 7,50 км/с; 4,01 км/с соответственно (табл1) (Сафаров, 1998).

Другой разновидностью изученных коровых эклогитов Урала являются породы второй группы – кварцсодержащие и мусковитизированные эклогиты (обр. 8420-1, 8420-2). Они сложены крупными зернами граната (20-20,5%), мусковита (5-15%) и светло-зеленоватыми зернами глаукофана (3%), кварц заполняет промежутки между зернами клинопироксена и составляет 20-30%, клинопироксен – 30-50%. Структура эклогитовая, без трещин. Среди представленных эклогитов они занимают промежуточное положение по величинам скоростей упругих волн при атмосферном и высоком давлении. При атмосферном давлении плотность образцов составляет 3,16-3,30 г/см<sup>3</sup>, при 2,0 ГПа – 3,30-3,43 г/см<sup>3</sup>. В этой группе пород наблюдается уменьшение скорости волн с увеличением в составе эклогита количества мусковита. В эклогите (обр. 8420-2) с содержанием 15% мусковита скорость продольных и попе-

речных волн наименьшая:  $V_p = 4,73$  км/с;  $V_s = 3,48$  км/с при атмосферном давлении и  $V_p = 7,90$  км/с;  $V_s = 4,22$  км/с при 2,0 ГПа, а для эклогита (обр.8420-1), содержащего до 5% мусковита, значения скорости составляют 5,43 км/с; 3,58 км/с и 8,12 км/с; 4,61 км/с соответственно (табл.1).

Как показали исследования, при высоких термодинамических условиях среди коровых эклогитов Урала довольно высокими значениями скоростей продольных и поперечных волн характеризуются породы первой группы – порфирокластические эклогиты (обр.311в-1, 311в-2). Это объясняется тем, что главными породообразующими минералами этих пород являются гранат и пироксен. Присутствие в эклогитах этих двух минералов, составляющих в сумме 90-95%, определяет высокие значения скоростей упругих волн пород первой группы, достигающие  $V_p = 8,22-8,35$  км/с;  $V_s = 4,95-5,02$  км/с при давлении 2,0 ГПа. Плотность этих эклогитов при том же давлении достигает величины 3,40-3,60 г/см<sup>3</sup> (табл.1).

Зависимость скоростей продольных и поперечных волн от давления в образцах коровых эклогитов Урала показана на рис.1б. Наблюдается хорошее соответствие между степенью измененности пород и скоростями упругих волн. Образцы коровых эклогитов Урала по минеральному составу отличаются тем, что содержат минералы граната, пироксена, кварца, мусковита, глаукофана и др. В связи с этим содержание граната и пироксена, дающее в сумме до 90-95%, и в тесной связи с этим наиболее высокие значения скоростей продольных и поперечных волн среди исследованных групп коровых эклогитов наблюдаются у образцов первой группы – порфирокластических эклогитов. В породах второй группы – кварцсодержащих и мусковитизированных эклогитах – значения скоростей упругих волн несколько ниже. Минимальное значение скоростей упругих волн получено для образцов третьей группы – глаукофанизированных эклогитов.

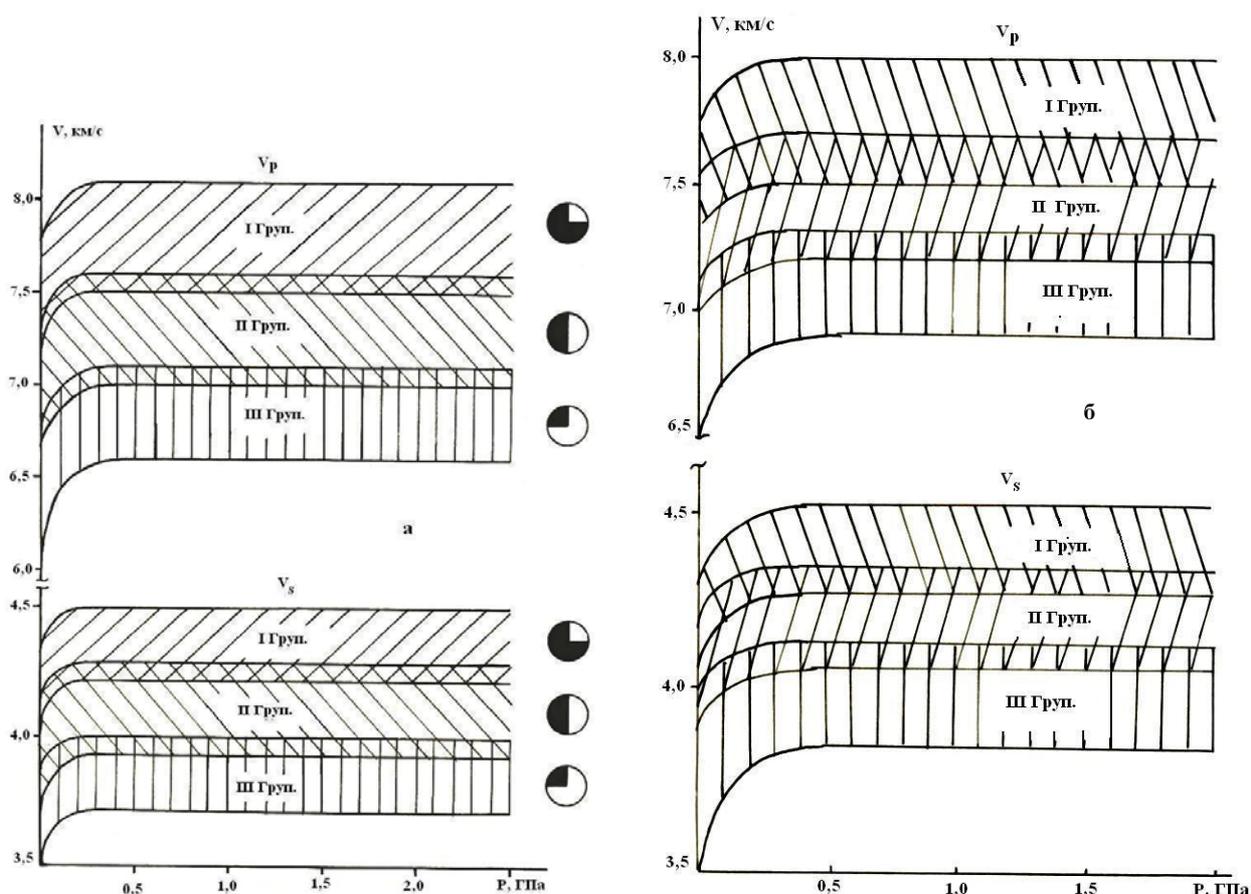


Рис. 1. Зависимость скоростей упругих волн от давления для образцов коровых эклогитов Кокчетавского массива – (а) (в кружках-процентное содержание граната в породах) и Урала – (б): I- порфирокластические эклогиты; II—мусковитизированные эклогиты; III – глаукофанализованные эклогиты.

**Коровые эклогиты Южного Тянь-Шаня.** Примером многоэтапного метаморфизма эклогитосодержащих комплексов Южного Тянь-Шаня и их сложной геологической позиции могут быть эклогиты Атбашинского хребта, развитые в пределах одноименной свиты. Атбашинский комплекс расположен в зоне одноименного глубинного разлома, относящегося к южному окончанию системы Урал-Тяньшаньского линейamenta. Атбашинская свита имеет сложное тектоническое строение и сложена разновозрастными породами. Самые древние из них, включающие эклогиты, залегают в ядрах антиформных складок. Характерно, что в зонах разломов наблюдаются процессы глаукофанизации, которые захватывают как образования протерозоя (эклогитосодержащего блока), так и карбонового возраста графитистые сланцы и сланцы перми (Бакиров, 1978).

Все породы комплекса сильно метаморфизованы. Эклогиты в них образуют как линзовидные тела полосчатого сложения, так и будины. Состав и форма этих будин свидетельствуют о том, что они образовались по базальтам, а прогрессивная зональность в гранатах говорит о вторичной природе эклогитов. Условия образования эклогитов оцениваются:  $P=1,1-1,2$  ГПа,  $T=810-850^{\circ}C$ . Однако если внести поправку на завышение температуры при таком расчете она будет колебаться в пределах  $700-750^{\circ}C$ , т.е. в пределах устойчивости ассоциаций минералов, типичных для всех коровых эклогитов (Бакиров, 1978; Удовкина, 1985). Минеральный состав коровых эклогитов Южного Тянь-Шаня – гранат-альмандин (25-40%), зеленоватый клинопироксен (30-35%), рутил (3-5%), кварц (2-5%), роговая обманка (5-10%), клиноциозит, слюды (фенгит либо биотит). В качестве акцессорных встречаются апатит, циркон и др.

Изучение скоростей упругих волн и плотности в трех образцах коровых эклогитов (обр.940) показало, что как при атмосферном, так и при высоком давлении наблюдается отличие значений этих параметров в зависимости от направления измерения скорости. Для них характерны значения плотности от 2,56 до 2,76 г/см<sup>3</sup> при атмосферном давлении. Величины скоростей распространения продольных и поперечных волн при нормальных условиях колеблются от 4,52 до 6,10 км/с для волн  $V_p$  и от 3,02 до 3,48 км/с – для волн  $V_s$ . С повышением давления в коровых эклогитах наблюдается увеличение скоростей упругих волн, и при давлении до 2,0-2,5 ГПа скорости продольных волн составляют от 6,30 до 7,69 км/с, а поперечных волн – от 3,69 до 4,24 км/с (табл.1). При том же давлении для этих эклогитов плотность увеличивается на 4-5% от первоначального. Такой значительный разброс скоростей упругих волн и плотности при атмосферном и высоких давлениях в трех образцах коровых эклогитов Урала, изготовленных во взаимно перпендикулярных направлениях из одного куска пород, связан с вариацией состава минерала граната и составляет 1390 м/с для волн  $V_p$  и 550 км/с для волн  $V_s$  при давлениях 2,5ГПа.

В целом, высокие значения скоростей упругих волн и плотности в образцах коровых эклогитов позволяют сделать предположение о значительном участии этих пород в составе нижнекоровых горизонтов континентальной литосферы.

**Мантийные эклогиты Якутии.** Среди изученных включений глубинных пород из кимберлитовой трубки Якутии (Сибирская платформа) широким распространением пользуются пироп-диопсидовые полнокристаллические эклогиты. Фация мантийных эклогитов отчетливо характеризуется давлениями, которые при нормальном геотермическом градиенте превышают 1,5-2,0 ГПа и  $T=950-1000^{\circ}\text{C}$ . Мантийные эклогиты Якутии содержат гранат-пироп и диопсидовый пироксен, количество которых в породах составляет 90-95%. Изредка присутствует в небольшом количестве энстатит. Химические анализы пород показывают, что по содержанию кремнезема и глинозема эклогиты Якутии приближаются к основным породам, но в отличие от типичных базальтов

в них значительно меньше щелочей, особенно калия, больше магния; их железистость гораздо ниже, чем у базальтов. Гранат мантийных эклогитов относится к существенно пироповой разновидности и в целом близок к гранатам пироповых перидотитов. Моноклинный пироксен имеет диопсидовый состав; примесь жадеитового компонента составляет 10-20% (Лутц, 1975; Удовкина, 1985).

По петрологическим и химическим исследованиям, принято считать, что ксенолиты эклогитов кимберлитовых трубок несут наиболее полную информацию о строении верхней мантии (Лутц, 1975). Поэтому экспериментальные данные о физических параметрах как функциях давления для пород мантийных эклогитов из кимберлитовых трубок представляют большой интерес. Плотность мантийных эклогитов при атмосферном давлении варьирует от 3,0 до 3,50 г/см<sup>3</sup> (табл.2).

Следует отметить, что в образцах содержание граната-пиропа в общем объеме породы, составляет от 25 до 80%. Поэтому все образцы для исследования при высоких давлениях до 2,5 ГПа изготавливались из одного куска породы по его трем взаимно перпендикулярным направлениям. Так как гранат имеет более высокую скорость упругих волн ( $V_p=9,50$  км/с), чем другие минералы этой породы, то его содержание в образцах значительно влияет на величину скорости упругих волн (Волярович и др., 1981; Сафаров, 2003). В связи с этим по величинам скоростей упругих волн и в соответствии со степенью содержания граната изученные мантийные эклогиты Якутии можно разделить на три группы, в которых содержание граната в образцах соответственно составляет 25; 50; 75%.

Относительно низкие скорости при атмосферном и высоком давлении наблюдаются в образцах третьей группы (рис.2а), хотя в ряде случаев они имеют довольно высокую плотность (содержание граната в образцах составляет 25-30%). К таким породам относятся следующие образцы эклогитов: Л-69-28, 3636, 3628, 3630, 3632, 3633. При атмосферном давлении почти все они обладают плотностью более 3,0 г/см<sup>3</sup>. Скорость продольных волн при давлении до 2,0-2,5 ГПа изменяется от 7,0 до 8,0 км/с, а поперечных – от 4,0 до 4,40 км/с (табл.2).

Таблица 2

 Скорость продольных, поперечных волн и плотность мантийных эклогитов  
 при различных давлениях

Порода, номер образца и место отбора	Пара- метр $V_p, V_s$ (км/с), $\rho$ (г/см <sup>3</sup> )	Давление, ГПа				
		0,001	0,5	1,0	1,5	2,5
1	2	3	4	5	6	7
Эклогит – 3628 (Якутия)	$V_p$	6,13-6,92	6,82-7,50	6,92-7,61	7,10-7,84	7,36-8,08
	$V_s$	3,88-4,10	4,06-4,27	4,10-4,32	4,12-4,36	4,22-4,49
	$\rho$	3,20-3,20	3,21-3,25	3,23-3,26	3,26-3,27	3,28-3,28
"- " - 3629	$V_p$	6,66-7,20	7,82-8,10	8,08-8,38	8,40-8,70	8,70-8,84
	$V_s$	4,05-4,12	4,30-4,37	4,35-4,49	4,38-4,58	4,48-4,65
	$\rho$	3,32-3,33	3,36-3,37	3,38-3,38	3,39-3,39	3,41-3,42
"- " - 3630	$V_p$	5,10-6,10	7,10-7,24	7,22-7,51	7,34-7,73	7,54-8,00
	$V_s$	3,66-3,70	4,06-4,22	4,22-4,24	4,22-4,52	4,30-4,88
	$\rho$	3,31-3,33	3,34-3,35	3,34-3,35	3,35-3,39	3,36-3,42
"- " - 3631	$V_p$	6,53-6,71	7,76-8,36	7,96-8,53	8,02-8,82	8,42-9,07
	$V_s$	4,35-4,27	4,87-5,28	4,93-5,33	5,00-5,36	5,20-5,44
	$\rho$	3,37-3,38	3,41-3,41	3,42-3,43	3,44-3,45	3,45-3,46
"- " - 3632	$V_p$	6,40-6,48	7,17-7,30	7,20-7,48	7,25-7,68	7,38-7,86
	$V_s$	3,86-3,92	3,94-4,27	3,99-4,23	4,02-4,20	4,12-4,17
	$\rho$	3,31-3,37	3,38-3,41	3,40-3,43	3,42-3,45	3,42-3,47
"- " - 3633	$V_p$	6,16-6,23	7,07-7,27	7,17-7,40	7,08-7,63	7,30-7,97
	$V_s$	3,79-4,12	3,91-4,42	4,04-4,36	4,19-4,29	4,16-4,32
	$\rho$	3,28-3,37	3,31-3,42	3,34-3,44	3,35-3,46	3,36-3,49
"- " - 3635	$V_p$	6,65-6,90	8,31-8,36	8,50-8,58	8,60-8,72	8,82-9,00
	$V_s$	3,97-4,48	4,40-5,02	4,46-4,96	4,57-4,98	4,66-4,96
	$\rho$	3,24-3,41	3,33-3,44	3,35-3,46	3,36-3,47	3,39-3,49
"- " - Л-69-28	$V_p$	6,15-6,52	6,72-7,00	6,80-7,13	6,88-7,30	6,93-7,52
	$V_s$	3,91-3,92	4,00-4,05	3,98-4,08	3,96-4,10	3,98-4,10
	$\rho$	3,24-3,39	3,27-3,41	3,29-3,42	3,31-3,43	3,33-3,43
"- " - 3650	$V_p$	5,69-6,07	7,88-7,88	7,90-7,94	8,08-8,10	8,20-8,47
	$V_s$	4,02-4,12	4,42-4,44	4,48-4,48	4,51-4,54	4,60-4,70
	$\rho$	3,51-3,53	3,55-3,55	3,57-3,57	3,58-3,59	3,59-3,62

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7
"- " - 3625	$V_p$	6,49-6,82	7,71-8,14	7,72-8,20	7,82-8,22	8,00-8,26
	$V_s$	3,90-4,25	4,22-4,48	4,30-4,56	4,38-4,60	4,48-4,68
	$\rho$	2,93-3,41	2,96-3,46	2,98-3,48	3,02-3,50	3,08-3,52
"- " - 3636	$V_p$	5,60-6,28	6,50-6,50	6,67-6,84	6,85-7,60	6,92-7,95
	$V_s$	3,72-4,10	3,81-4,26	3,88-4,30	3,92-4,35	4,00-4,42
	$\rho$	3,13-3,37	3,19-3,43	3,22-3,45	3,22-3,47	3,23-3,49
Эклогит (Памир)-1	$V_p$	6,38-6,76	7,17-7,64	7,45-7,90	7,70-8,07	8,50-8,82
	$V_s$	3,83-3,88	4,14-4,18	4,16-4,23	4,20-4,22	4,40-4,50
	$\rho$	3,01-3,15	3,08-3,23	3,12-3,26	3,14-3,28	3,16-3,31
Гранулитизированный эклогит -10	$V_p$	6,05-6,53	7,02-7,16	7,16-7,28	7,44-7,40	7,72-8,12
	$V_s$	3,56-4,02	4,08-4,30	4,03-4,28	4,00-4,28	4,08-4,32
	$\rho$	3,02-3,06	3,09-3,14	3,12-3,17	3,14-3,19	3,17-3,22
Эклогит с амфиболом и дистеном - 4	$V_p$	5,74-5,80	6,84-7,31	7,12-7,53	7,38-7,69	8,02-8,34
	$V_s$	3,54-3,82	4,05-4,40	4,11-4,38	4,17-4,36	4,20-4,40
	$\rho$	2,97-3,13	3,04-3,20	3,08-3,24	3,09-3,25	3,12-3,29

Среди представленных мантийных эклогитов Якутии самыми высокими значениями скоростей упругих волн и плотности при атмосферном и высоких давлениях характеризуются свежие, малоизмененные вторичными процессами образцы первой группы – 3629; 3631 и 3635, состоящие в основном из граната (70-75%), обладающего высокой упругостью (рис.2а). При атмосферном давлении плотность этих образцов составляет 3,25-3,44 г/см<sup>3</sup>. Скорости продольных и поперечных волн изменяются у них в следующих пределах: 8,50-9,10 км/с и 4,60-5,40 км/с при давлении 2,5 ГПа соответственно (табл.2).

Некоторые промежуточные положения (рис.2а) среди мантийных эклогитов Якутии по скоростям упругих волн занимают образцы второй группы – 3625 и 3650 (содержание граната ~50%). При атмосферном давлении плотность этих образцов составляет от 3,0 до 3,50 г/см<sup>3</sup>. Скорости продольных и поперечных волн для этих пород меняются в следующих пределах: 8,0-8,50 км/с и 4,40-4,60 км/с при давлении 2,0-2,5 ГПа соответственно (табл.2). Надо отметить, что среди изученных

образцов в образце эклогита 3650 с максимальной плотностью 3,40-3,50 г/см<sup>3</sup> скорость продольных волн при атмосферном давлении оказалось очень низкой – 5,69-6,07 км/с, что связано со значительной трещиноватостью и пористостью пород. С повышением давления в этом образце наблюдается увеличение скоростей упругих волн во всем диапазоне давлений, а при давлении 2,0-2,05 ГПа скорость достигает 8,20-8,48 км/с.

В целом, степень увеличения скоростей упругих волн при повышении давления от атмосферного до 2,5 ГПа в изученных мантийных эклогитах составляет от 40 до 60%.

**Мантийные эклогиты Памира.** На восточном Памире ксенолиты эклогитов встречаются в одной из неогеновых трубок фергусит-порфиоров, развитых в зоне регионального разлома. Среди них встречаются альмандиновые, рутиловые, кианитовые разности, эклогиты с ильменитом и корундом. Корунд найден в измененных породах. Некоторые из эклогитов Памира по минеральному составу имеют сходство с включениями кимберлитовых трубок Сибири. По химизму и условиям залегания

большинство эклогитов Памира так же, как эклогиты Якутии, относятся к базальтовому типу, реже встречаются магнезиальные разновидности трактолитового типа. Большинство эклогитов представлены биминеральными породами, состоящими из зеленого пироксена, граната, составляющих примерно 90-95%, а также аксессуарных – рутила, апатита, ильменита и пирита. В кианитовых разновидностях присутствует кварц. Согласно имеющимся петрологическим исследованиям, изученные мантийные эклогиты Памира образовались при давлении порядка 1,5-2,0 ГПа и температурах около 1000-1200° С (Удовкина, 1985).

Для большинства эклогитов Памира плотность образцов при атмосферном давлении варьирует от 3,0 до 3,30г/см<sup>3</sup>. По величинам скоростей упругих волн и в соответствии со степенью измененности изученные эклогиты Памира можно разделить на три группы.

Среди изученных мантийных эклогитов Памира самые высокие скорости продольных и поперечных волн (рис.2б) наблюдаются у образцов первой группы – в неизменных эклогитах (обр.1). Порода сложена в основном из крупнозернистого граната – 45-50%, который окаймляется рудными минералами (10%); шпинели (5%); клинопироксена (40-50%). Плотность образцов для этих эклогитов колеблется в пределах от 3,01 до 3,15 г/см<sup>3</sup> при атмосферном давлении. При давлении до 2,0-2,5 ГПа значения скорости этих эклогитов варьируют от 8,50 до 8,80 км/с для продольных волн и от 4,40 до 4,50 км/с для поперечных волн (табл.2). Это объясняется высоким процентным содержанием высокоскоростного минерала граната пиропового состава. Относительное возрастание плотности при давлениях до 2,0-2,5 ГПа составляет 4-6%.

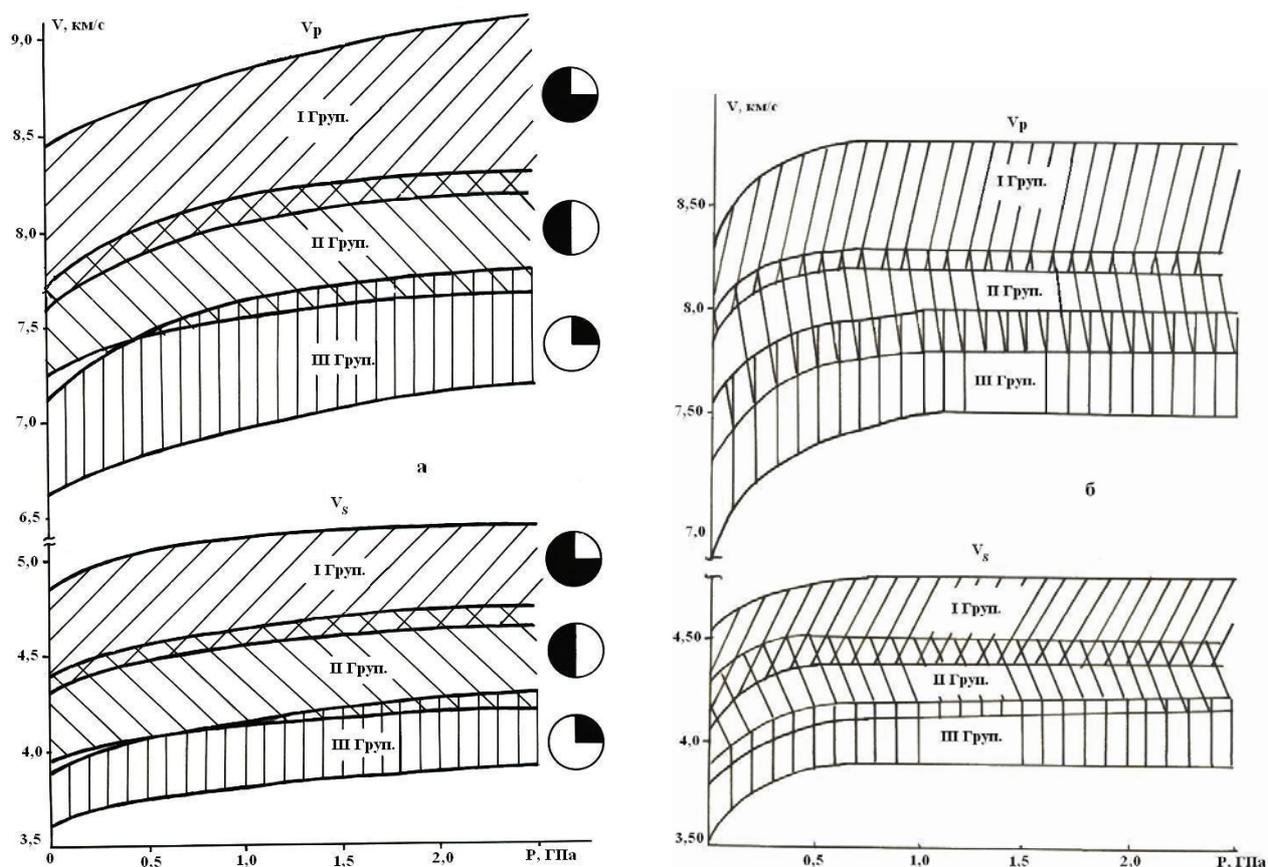


Рис. 2. Зависимость скоростей упругих волн от давления для образцов мантийных эклогитов Якутии – (а) (в кружках-процентное содержание граната в породах) и Памира – (б): I - неизменные эклогиты; II - эклогиты с амфиболом и дистеном; III - гранулитизированные эклогиты

Переходные разности, такие как эклогиты с амфиболом и дистеном (обр.4), имеют скорости продольных и поперечных волн ниже, чем собственно эклогиты и занимают некоторые промежуточные положения среди мантийных эклогитов Памира (образцы второй группы). Порода состоит в основном из клинопироксена (60-70%), по краям которого нередко развивается волокнистый амфибол (5%), рудных минералов (10%) и граната (20%). При атмосферном давлении плотность этих образцов составляет 2,97 – 3,13 г/см<sup>3</sup>. В полном соответствии с минеральным составом для этих мантийных эклогитов величины скоростей продольных и поперечных волн меняются в следующих пределах: от 8,10 до 8,34 км/с для волн  $V_p$  и от 4,20 до 4,40 км/с для волн  $V_s$  при давлении 2,0-2,5 ГПа (табл.2). При тех же давлениях плотность колеблется от 3,12 до 3,29 г/см<sup>3</sup>.

Наиболее низкие скорости продольных и поперечных волн наблюдаются у гранулитизированных эклогитов (образцы третьей группы), что объясняется содержанием в их составе до 20% кварца. Кроме кварца, порода состоит из крупнозернистого граната (20%), шпинели (10%), клинопироксена (35%), ортопироксена (15-20%) (обр.10). Эти породы обладают следующими значениями скоростей продольных и поперечных волн:  $V_p = 6,05-6,53$  км/с;  $V_s = 3,56-4,02$  км/с при нормальных условиях и  $V_p = 7,72-8,12$  км/с;  $V_s = 4,08-4,32$  км/с при давлении 2,5 ГПа. Плотность гранулитизированных эклогитов при атмосферном давлении составляет 3,02-3,06 г/см<sup>3</sup>, при высоком давлении 2,5 ГПа она достигает 3,17-3,22 г/см<sup>3</sup> (табл.2).

В целом, значения скоростей продольных и поперечных волн в эклогитах Памира и Якутии близки к мантийным сейсмическим скоростям.

Анизотропия скоростей упругих волн при высоких давлениях в коровых и мантийных эклогитах обусловлена ориентировкой пироксена, а при нормальных условиях – ориентировкой микрощелевых пор. В шлифах пироксен имеет линейно-вытянутую ориентировку в направлении [001]. По данным микроструктурного анализа количество ориентиро-

ванного пироксена в исследованных образцах эклогитов составляет ~10%.

При нормальных условиях в изученных образцах коровых и мантийных эклогитов значения коэффициента анизотропии скоростей продольных - $A_p$  и поперечных - $A_s$  волн составляют 10-15%. Это указывает на то, что коровые и мантийные эклогиты обладают трещиноватостью и пористостью, которые не ликвидируются даже при давлении 1,0-1,5 ГПа. Наибольшая величина коэффициента анизотропии скоростей продольных и поперечных волн для коровых и мантийных эклогитов при давлении 2,0-2,5 ГПа не превышает 3-5% (Сафаров, 2003).

### Выводы

1. Изучены упругие и плотностные характеристики мантийных и коровых эклогитов Сибирской платформы, Памира, Казахстана, Урала и Тянь-Шаня при высоких термодинамических условиях.

2. Установлено, что область изменения скоростей упругих волн для коровых и мантийных эклогитов при высоких давлениях варьирует в довольно широких пределах, что связано со структурными неоднородностями и частичной измененностью этих пород вторичными процессами.

3. Полученные упругие и плотностные свойства коровых эклогитов при высоких термодинамических условиях позволяют сделать предположение о том, что эти физические параметры могут соответствовать сейсмическим характеристикам корово-мантийной смеси континентальной коры.

4. Средние значения скоростей упругих волн и плотности, измеренные в образцах мантийных эклогитов при высоких термодинамических условиях, могут отождествляться с сейсмическими скоростями подкорового слоя нормальной верхней мантии континентов.

### ЛИТЕРАТУРА

- БАКИРОВ, А.Б. 1978. Тектоническая позиция метаморфических комплексов Тянь-Шаня. Илим. Фрунзе. 260 с.
- ВОЛАРОВИЧ, М.П., КИРЕЕНКОВА, С.М. 1971. Скорости продольных волн в породах эклогитовой фации Ю.Урала при высоких давлениях в зависимости от

- степени метаморфизма. В кн.: *Тектонофизика и механические свойства горных пород*. Наука. Москва. 170-173.
- ВОЛАРОВИЧ, М.П., ЛУТЦ, Б.Г., КИРЕЕНКОВА, С.М., САФАРОВ, И.Б. 1981 а. Упругие характеристики мантийных эклогитов при давлениях до 25 кбар. *Изв. АН СССР, Сер. Физика Земли*, 66-71.
- ВОЛАРОВИЧ, М.П., КИРЕЕНКОВА, С.М., САФАРОВ, И.Б. 1981 б. Упругие характеристики глубинных горных пород из трубок Памира и Тянь-Шаня при давлениях до 25 кбар. В кн.: *Процессы и свойства вещества Земли*. Наука. Москва. 3-9.
- ГАЛДИН, Н.Е. 1977. Физические свойства глубинных метаморфических и магматических пород при высоких давлениях и температурах. Недра. Москва. 125 с.
- ГЕНШАФТ, Ю.С. 1974. Экспериментальное моделирование минерального состава низов коры и верхней мантии. Наука. Москва. 32-45.
- СОБОЛЕВ, В.С. и др. (под ред.). 1975. Глубинные ксенолиты и верхняя мантия. Наука СО. Новосибирск. 271 с.
- КИРЕЕНКОВА, С.М., САФАРОВ, И.Б. 1988. Построение вещественных разрезов по данным ГСЗ и скоростей упругих волн и плотности горных пород при высоких р, Т-условиях. В кн.: *Современное состояние сейсмологических исследований в Европе*. Наука. Москва. 266-271.
- Кимберлиты и кимберлитоподобные породы. 1990. Кимберлиты - ультраосновная формация древних платформ. Наука, Новосибирск. 264
- КУШЕВ, В.Г., ВИНОГРАДОВ, Д.П. 1978. Метаморфогенные эклогиты. Наука СО. Новосибирск. 112с.
- ЛУТЦ, Б.Г. 1975. Химический состав континентальной коры и верхней мантии Земли. Наука. Москва. 167с.
- РИНГВУД, А.Е. 1981. Состав и петрология мантии Земли. Недра. Москва. 584 с.
- САФАРОВ, И.Б., ЛЕВЫКИН, А.И. 1992. Устройство для определения упругих характеристик материалов. А.С.№1742710, СССР, БИ, №23.
- САФАРОВ, И.Б. 1998. Сопоставление петрофизических данных древней и новообразованной коры в зоне офиолитового комплекса Урала. *Изв. АН Азербайджана. Науки о Земле*, 3, 113-121.
- САФАРОВ И.Б. 2003. Анизотропия упругих свойств горных пород при высоких термодинамических условиях и петрофизические модели литосферы. Автореф. док. дисс., Баку. ИГ НАНА. 47с.
- УДОВКИНА, Н.Г. 1985. Эклогиты СССР. Наука. Москва. 285с.

**Рецензент: член-корр. НАН Азербайджана Г.Г.Кулиев**