

© И.Б.Сафаров, Н.М.Ширинов, 2008

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА ИЗОТРОПНЫЕ УПРУГИЕ МОДУЛИ МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД

И.Б.Сафаров, Н.М.Ширинов

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

Ультразвуковым методом в модифицированной твердофазной установке высокого квазигидростатического давления изучены скорости продольных, поперечных волн, а также плотность магматических пород. На основе экспериментальных данных о скоростях упругих волн и плотности горных пород при высоких термобарических условиях рассчитаны упругие параметры и коэффициенты Пуассона. Анализ полученных расчетных данных показывает, что изменения величины упругих параметров для разных глубинных пород объясняется возможными вариациями вещественного состава литосферы Земли. Установлены связь модулей упругости и коэффициента Пуассона с минеральным составом и структурными особенностями рассматриваемых сред и их повышение с ростом основности изверженных пород.

### Введение

В настоящее время для решения многих задач геофизики большое значения приобретают теоретические и экспериментальные исследования упругих модулей горных пород и минералов при высоких давлениях (Жарков, Калинин, 1968; Калинин, 2000; Калинин, Баян и др., 1993; Кулиев, Ширинов, 2005; 2006; Гасанов, Сафаров, 1988).

В последние годы проведено небольшое число измерений упругих модулей второго порядка горных пород и минералов в различных интервалах высоких давлений и температур (Кулиев, Ширинов, 2005). Обычно в большинстве работ при изучении свойств горных пород и минералов в условиях высоких давлений ограничиваются измерениями скоростей продольных волн, значительно реже определяются параллельно и скорости поперечных волн. Зная два упругих параметра изотропного твердого тела (например, скорости продольных  $V_p$  и поперечных  $V_s$  волн) и еще дополнительно плотность  $\rho$ , можно по общеизвестным формулам теории упругости рассчитать все динамические модули упругости и коэффициенты Пуассона (Воларович и др., 1974; Дортман, 1992; Сафаров, 2003).

Предлагаемая работа посвящена исследованию упругих модулей второго порядка и коэффициента Пуассона магматических пород

при высоких термодинамических условиях. Эксперименты проводились в твердофазной установке типа цилиндр-поршень (Воларович и др. 1974) по методике, разработанной ранее (Киреевкова, Сафаров, 1979). Эта методика предусматривает одновременное определение скоростей продольных и поперечных волн, а также плотности в процессе одного опыта на одном образце горных пород при высоких термобарических условиях.

### Результаты и их обсуждение

При более эффективной интерпретации скоростных разрезов, получаемых из сейсмических наблюдений, а также установлении состава глубинных зон земной коры значительный интерес представляет исследование причин, определяющих изменение коэффициента Пуассона и динамических модулей упругости.

Для исследования скоростей продольных и поперечных волн, а также плотности при высоких термобарических условиях были отобраны образцы магматических пород различных регионов, представляющих разные структурно-тектонические области (Сафаров, 2003). Данные о скоростях упругих волн и плотности по группам горных пород приведены в табл. 1.

Андезитовые породы. Среди изученных магматических пород наименьшими значе-

ниями скоростей упругих волн и плотности обладают андезитовые породы. Для исследованных групп андезитов (обр. 16,17,19) главными породообразующими минералами являются плагиоклаз, пироксены ромбические и моноклинные. Кроме этих минералов, местами встречаются кварц, магнетит, апатит и сфен. Обычно присутствует также вулканиче-

ское стекло. При атмосферном давлении образцы андезитов обладают плотностью 2,0-2,40 г/см<sup>3</sup>, скоростями упругих волн 3,30-4,30 км/с для волн  $V_P$  и 2,05-2,65 км/с для волн  $V_S$ . При давлении 1,5 ГПа скорости этих пород варьируют для продольных волн от 4,20 до 5,40 км/с, а для поперечных – от 2,25 до 3,0 км/с (табл. 1).

Таблица 1

Скорости продольных  $V_P$ , поперечных  $V_S$  волн (км/с) и плотность  $\rho$  (г/см<sup>3</sup>) при разных давлениях  $P$  (ГПа) для магматических пород

№№	Порода, номер образца, место отбора	Параметр	$V_P, V_S, \rho$ при $P$ (ГПа)				
			0,001	0,1	0,5	1,0	1,5
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Анальцимовый базальт (Памир)-8	$V_P$	5,35	6,04	6,24	6,38	6,44
		$V_S$	3,24	3,50	3,58	3,59	3,63
		$\rho$	2,58	2,60	2,65	2,67	2,68
2	Базальт	$V_P$	5,50	5,76	5,78	5,94	6,16
		$V_S$	3,07	3,13	3,14	3,20	3,27
		$\rho$	2,68	2,71	2,77	2,79	2,80
3	Андезит (о. Кипр)-19	$V_P$	3,93	4,55	4,74	5,03	5,36
		$V_S$	2,53	2,73	2,79	2,86	2,96
		$\rho$	2,42	2,46	2,56	2,63	2,66
4	«-----»-16	$V_P$	3,28	3,30	3,65	3,87	4,14
		$V_S$	2,05	2,10	2,20	2,20	2,22
		$\rho$	1,95	2,08	2,20	2,22	2,24
5	«-----»-17	$V_P$	4,32	4,44	4,58	4,70	4,82
		$V_S$	2,63	2,74	2,76	2,80	2,84
		$\rho$	2,34	2,35	2,44	2,48	2,52
6	Базальт-23	$V_P$	4,99	5,42	5,56	5,82	6,14
		$V_S$	3,08	3,12	3,18	3,27	3,40
		$\rho$	2,66	2,68	2,73	2,78	2,80
7	Базальт-36	$V_P$	4,99	5,21	5,40	5,71	6,07
		$V_S$	3,02	3,07	3,13	3,21	3,33
		$\rho$	2,55	2,65	2,71	2,74	2,77
1	2	3	4	5	6	7	8
8	Габбро-норит 39	$V_P$	6,70	7,28	7,43	7,57	7,76
		$V_S$	3,84	3,96	4,01	4,07	4,15
		$\rho$	2,98	3,05	3,09	3,12	3,14
9	«-----»-42	$V_P$	6,69	7,38	7,47	7,60	7,73
		$V_S$	3,88	3,94	4,04	4,11	4,20
		$\rho$	3,02	3,10	3,14	3,17	3,19
10	«-----»-43	$V_P$	6,68	7,31	7,42	7,55	7,80
		$V_S$	3,92	4,00	3,98	4,05	4,12
		$\rho$	2,90	2,95	3,00	3,03	3,08
11	Лейкократовое габбро-40	$V_P$	6,44	6,80	6,94	7,10	7,31
		$V_S$	3,51	3,56	3,59	3,63	3,75
		$\rho$	2,95	2,96	3,00	3,02	3,04

**Базальтоиды.** Изученная группа базальтов (обр. 8,9,23,36) в основном состоит из плагиоклаза, оливина, моноклинного пироксена, ортоклаза, рудных минералов и др. Среди представленных магматических пород они занимают промежуточное положение по величинам скоростей упругих волн при атмосферном и высоком давлении. При атмосферном давлении плотность образцов составляет 2,55-2,68 г/см<sup>3</sup>. С повышением давления плотность данного типа пород увеличивается сравнительно мало. Значения скоростей упругих волн при атмосферном давлении меняются от 5,0 до 5,50 км/с для волн  $V_p$  и от 3,20 до 3,25 км/с – для волн  $V_s$ . При давлении 1,5 ГПа значения скоростей продольных и поперечных волн достигают величин соответственно от 6,10 до 6,44 км/с и от 3,30 до 3,63 км/с (табл. 1).

**Габброидные породы.** Как показали исследования, при высоких термобарических условиях среди магматических пород довольно высокими значениями скоростей упругих волн характеризуются габброидные породы (обр. 39,40,42,43). Эти породы состоят из плагиоклаза, клинопироксена, ортопироксена, оливина, магнетита и др. При нормальных условиях испытанные образцы габбро имеют близкие значения плотности 2,90-3,0 г/см<sup>3</sup>. Скорости упругих волн габброидных пород при атмосферном давлении колеблются от 6,44 до 6,70 км/с для продольных и 3,50 до 3,92 км/с – для поперечных волн, а при давлении 1,5 ГПа они соответственно равны 7,30-7,80 км/с и 3,75-4,20 км/с (табл. 1).

При воздействии на образец упругих ультразвуковых импульсов малой мощности (т.е. акустических сигналов малой амплитуды) величины возникающих при этом напряжений довольно малы, причем эти воздействия очень кратковременны и практически не вызывают необратимых, неупругих процессов.

Динамические модули упругости и коэффициенты Пуассона рассчитываются по следующим формулам: Классический подход. Модуль сдвига:

$$\mu = \rho V_s^2 . \quad (1)$$

Модуль объемного сжатия :

$$\lambda = \rho V_p^2 - V_s^2 . \quad (2)$$

Коэффициент Пуассона :

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} , \quad (3)$$

где  $\rho$  - плотность среды;  $V_p$  и  $V_s$  – соответственно скорости продольных и поперечных упругих волн.

Уравнения (1) и (3) использовались для вычисления модуля упругости некоторых горных пород на основании имеющихся экспериментальных данных, полученных при высоких давлениях. В наших расчетах были использованы средние данные скоростей упругих волн ряда опытов, проведенных с магматическими изотропными горными породами в интервале давлений от атмосферного до 1,5 ГПа.

В таблице 2 для изученных групп горных пород из различных регионов при высоких термобарических условиях приведены значения модуля объемного сжатия  $\lambda$ , модуля сдвига  $\mu$ , коэффициента Пуассона  $\nu$ , рассчитанных, исходя из экспериментальных данных по обеим скоростям и плотности. Для зависимости упругих параметров изученных групп горных пород от давления характерным является монотонной рост их с давлением для фазы низкого давления и затем дальнейшее их слабое увеличение – для фазы высокого давления.

Измерение скоростей упругих волн на образцах горных пород в диапазоне давлений от атмосферного до 1,5 ГПа показало, что величины  $V_p$  и  $V_s$  зависят как от термодинамических условий, так и от вещественного состава. Поскольку коэффициент Пуассона фактически определяется отношением скоростей продольных и поперечных волн, а величина этого отношения может как увеличиваться, так и уменьшаться при повышении давления, характер изменения его зависимости от давления подобен зависимости  $V_p$  и  $V_s$  от давления. При нормальных условиях в изученных горных породах минимальная величина  $\nu = 0,15-0,18$  отмечена для андезитов (табл. 2). Зависимость  $\nu = f(p)$  показывает, что с увеличением давления в основном идет возрастание коэффициента Пуассона в интервале давлений 0,1-1,5 ГПа, при комнатной температуре в изученных горных породах (андези-

тах, базальтах, гранитах, габбро) он, как правило, увеличивается на 3-4% (рис. 1в). Увеличение по направлению к основанию коры отношения  $V_p/V_s$  от 1,70 ( $\sigma = 0,240$ ) до 1,75-1,85 ( $\sigma = 0,280$ ), установленное по результатам

( $\sigma = 0,280$ ), установленное по результатам сейсмических исследований, подтверждает достоверность полученных величин.

Таблица 2

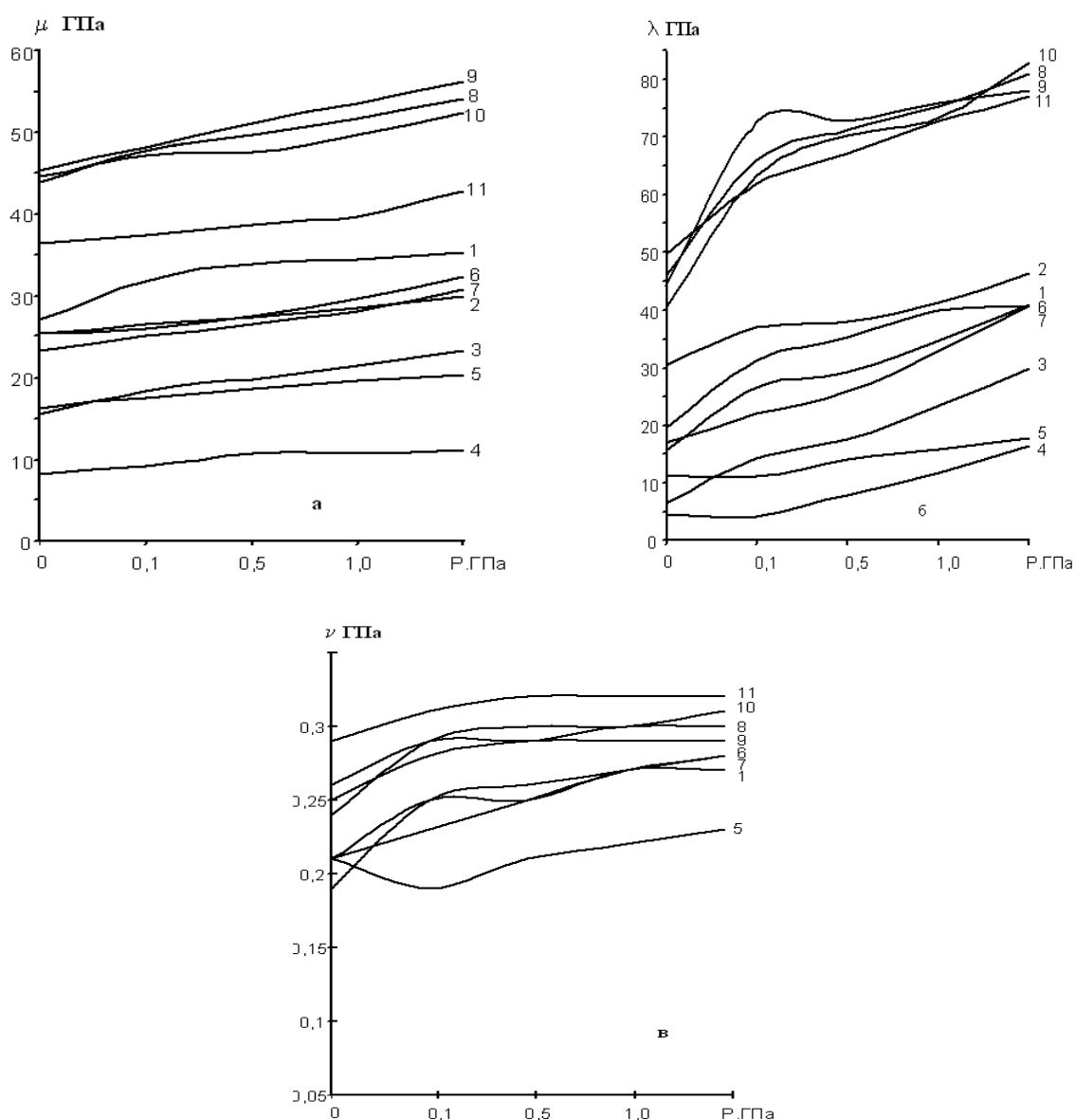
Численные значения модулей упругости и коэффициента Пуассона  
магматических пород при высоких давлениях  
Классический подход

№№	Порода, номер образца, место отбора	Параметр (ГПа)	Значения упругих параметров при P (ГПа)				
			0,001	0,1	0,5	1,0	1,5
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Анальцимовый базальт (Памир)-8	$\mu$	27,08	31,85	33,96	34,41	35,31
		$\lambda$	19,68	31,15	35,26	39,86	40,52
		$\nu$	0,21	0,25	0,25	0,27	0,27
2	Базальт	$\mu$	25,26	26,55	27,31	28,57	29,94
		$\lambda$	30,55	36,81	37,92	41,30	46,37
		$\nu$	0,27	0,29	0,29	0,30	0,30
3	Андезит (о. Кипр)-19	$\mu$	15,49	18,33	19,93	21,51	23,31
		$\lambda$	6,40	14,26	17,66	23,52	29,81
		$\nu$	0,15	0,22	0,23	0,26	0,28
4	«----«----«-16	$\mu$	8,19	9,17	10,65	10,74	11,04
		$\lambda$	4,59	4,31	8,01	11,76	16,31
		$\nu$	0,18	0,18	0,21	0,26	0,30
5	«----«----«-17	$\mu$	16,19	17,64	18,59	19,44	20,33
		$\lambda$	11,30	11,04	14,01	15,90	17,90
		$\nu$	0,21	0,19	0,21	0,22	0,23
1	2	3	4	5	6	7	8
6	Базальт-23	$\mu$	25,23	26,09	27,61	29,73	32,37
		$\lambda$	15,77	26,55	29,18	34,71	40,82
		$\nu$	0,19	0,25	0,26	0,27	0,28
7	Базальт-36	$\mu$	23,26	24,98	26,55	28,23	30,72
		$\lambda$	16,98	21,98	25,92	32,87	40,63
		$\nu$	0,21	0,23	0,25	0,27	0,28
8	Габбро-норит 39	$\mu$	43,94	47,83	49,69	51,68	54,08
		$\lambda$	45,89	65,99	71,21	75,43	80,93
		$\nu$	0,26	0,29	0,29	0,30	0,30
9	«----«----«-42	$\mu$	45,46	48,12	51,25	53,55	56,27
		$\lambda$	44,23	72,59	72,72	76,00	78,07
		$\nu$	0,25	0,28	0,29	0,29	0,29
10	«----«----«-43	$\mu$	44,56	47,20	47,52	49,70	52,28
		$\lambda$	40,28	63,24	70,13	73,32	82,82
		$\nu$	0,24	0,29	0,30	0,30	0,31
11	Лейкократовое габбро-40	$\mu$	36,34	37,51	38,66	39,79	42,75
		$\lambda$	49,66	61,84	67,16	72,65	76,95
		$\nu$	0,29	0,31	0,32	0,32	0,32

Модуль объемного сжатия  $\lambda$  для изученных групп горных пород с ростом давления сильно возрастает. Максимальное изменение модуля объемного сжатия при нормальных условиях получено для габброидных пород, и его величина варьирует от 40,28 до 49,66 ГПа, а для базальтоидных пород она колеблется от 15,77 до 30,55 ГПа. Минимальными величинами этого параметра обладают андезиты, и при атмосферном давлении эти значения меняются от 4,59 до 11,30 ГПа. Модуль объемного сжатия ( $\lambda$ ) с увеличением давления (0,1-1,5 ГПа)

для изученных групп горных пород возрастает на 20-25 % (рис. 1 б).

Максимальные значения модуля сдвига  $\mu$  при нормальных условиях получены для изученных габброидных пород и варьируют от 36,34 до 45,46 ГПа, а минимальными величинами этого параметра характеризуются андезиты, они меняются от 8,19 до 16,19 ГПа. С увеличением давления в основном происходит возрастание модуля сдвига и в интервале давлений от 0,001 до 1,5 ГПа для изученных горных пород оно составляет 10-15% (рис. 1 а).



**Рис. 1.** Зависимость значений модуля сдвига (а), модуля сжатия (б) и коэффициента Пуассона (в) от давления для образцов габбро (8,9, 10,11), базальтов (1,2,6,7), андезитов (3,4,5). Классический подход

Представляло интерес изучать влияние высокого давления на модули упругости второго порядка и коэффициенты Пуассона в разнотипных магматических породах из отдельных геологических регионов. Информативность упругих параметров горных пород обусловлена тем, что эти параметры количественно и качественно отражают характер взаимодействия микро- и макрокомпонентов и в целом состояния вещества в процессе деформации.

Поэтому особенности описываемых данных, которые приведены в табл. 3 и 4 для горных пород разного состава, заключаются в том, что эти данные получены в результате пересчета значений, установленных предыдущими исследованиями при высоких давлениях. Динамические модули упругости второго порядка и коэффициенты Пуассона рассчитываются по следующим формулам: Неклассический подход.

1. В случае «натуральных» или «естественных» скоростей.

а. Второй вариант теории малых начальных деформации:

Модуль сдвига:

$$\mu = \rho V_S^2 + P . \quad (4)$$

Модуль объемного сжатия:

$$\lambda = \rho V_P^2 - \rho V_S^2 - P . \quad (5)$$

Коэффициент Пуассона:

$$\nu_0 = \frac{\lambda}{\lambda + P} \cdot \nu . \quad (6)$$

б. Теории больших начальных и первый вариант теории малых начальных деформации:

Модуль сдвига:

$$\mu = \rho V_S^2 + P \left( 1 + \frac{2\mu}{3K_0} \right) . \quad (7)$$

Модуль объемного сжатия:

$$\lambda = \rho V_P^2 - \rho V_S^2 - P \left( 1 - \frac{2\lambda}{3K_0} \right) . \quad (8)$$

Коэффициент Пуассона:

$$\nu_0 = \frac{\lambda}{\lambda + P} \cdot \nu . \quad (9)$$

Пересчет осуществляется с целью учета влияния на величины упругих характеристик давления и температуры, предполагаемых в более глубоких слоях недр. Анализ приведенных в таблицах результатов показывает, что вследствие увеличения давления до 1,5 ГПа происходит рост величины параметров  $\mu$ ,  $\lambda$  и  $\nu$ .

На рис 2 и 3 можно проследить, как влияют термобарические условия на модули упругости и коэффициент Пуассона. Высокое давление приводит к значительному росту упругих параметров в исследованных горных породах. Аналогичное влияние высокого давления на упругие параметры горных пород показано в работе (Кулиев, Ширинов, 2005; 2006). Рост  $\mu$ ,  $\lambda$  и  $\nu$  при повышении давления до 1,5 ГПа для исследованных пород наибольший в андезитах и составляет около 15%. Минимальное изменение упругих параметров при тех же термодинамических условиях наблюдается для габброидных пород и составляет приблизительно 10%, промежуточное значение (около 14%) получено для базальтоидных пород.

Таким образом, результаты исследования показывают, что количественные значения модулей упругости магматических пород при различных напряжениях, рассчитанные по вышеперечисленным формулам, существенно различаются. Причем характер этих отличий как в рамках классического подхода, так и неклассического (с учетом геометрической нелинейности) одинаков. По-видимому, данное обстоятельство свидетельствует о том, что для обработки используемых экспериментальных результатов учет только геометрической нелинейности недостаточен, необходимо учитывать также физическую нелинейность.

Таблица 3

Численные значения комбинированных модулей упругости второго порядка и коэффициента Пуассона для магматических пород при высоких давлениях. Неклассический подход

1. В случае «натуральных» или «естественных» скоростей

а. Второй вариант теории малых начальных деформаций

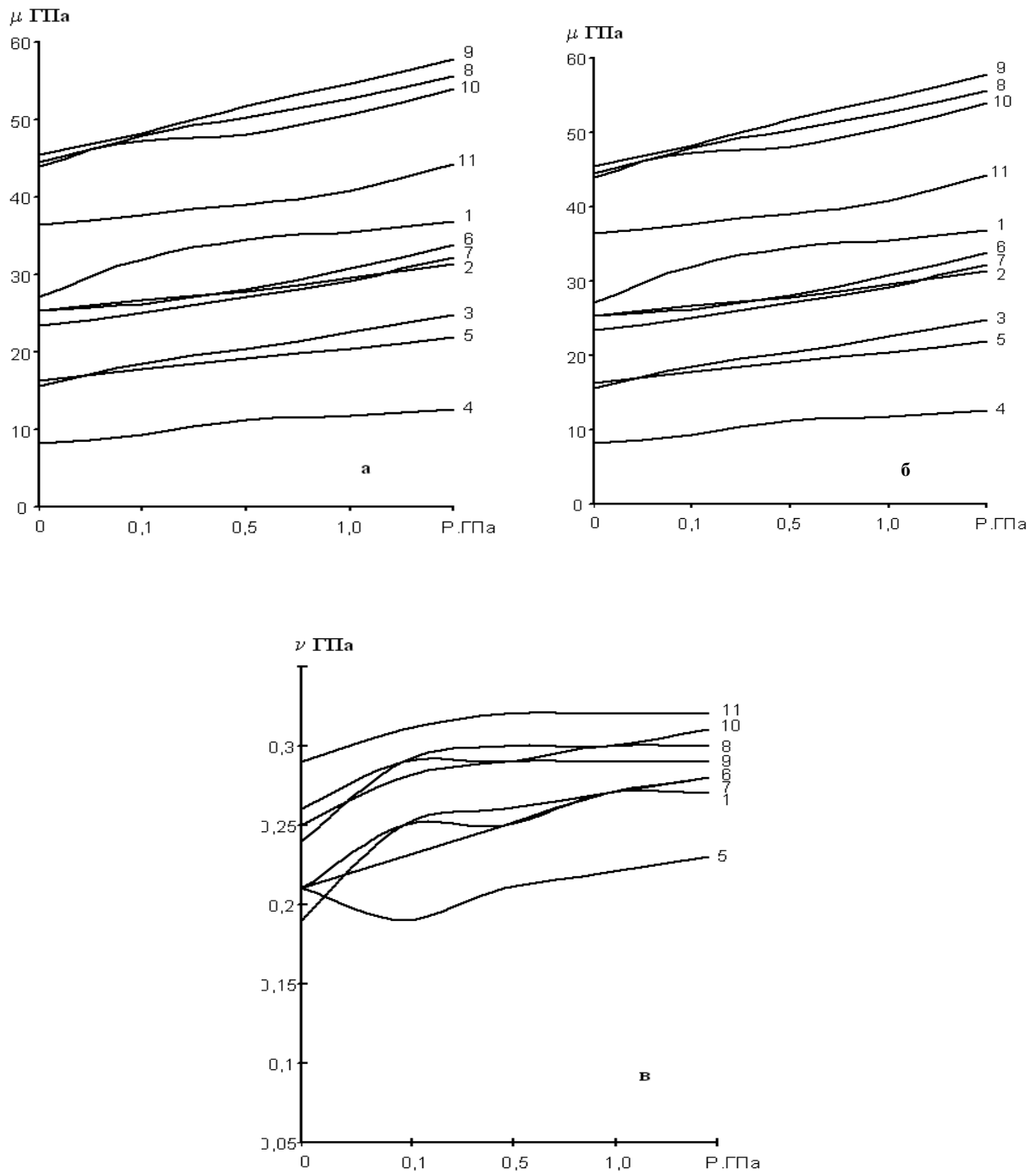
№№	Порода, номер образца, место отбора	Параметр	Значения упругих параметров при P (ГПа)				
			0,001	0,1	0,5	1,0	1,5
1	Анальцимовый базальт (Памир)-8	$\mu$	27,08	31,95	34,46	35,41	36,81
		$\lambda$	19,68	31,05	34,76	38,86	39,02
		$\nu$	0,21	0,25	0,25	0,26	0,26
2	Базальт	$\mu$	25,26	26,65	27,81	29,57	31,44
		$\lambda$	30,55	36,71	37,42	40,30	44,87
		$\nu$	0,27	0,29	0,29	0,29	0,29
3	Андезит (о. Кипр)-19	$\mu$	15,49	18,43	20,43	22,51	24,81
		$\lambda$	6,40	14,16	17,16	22,52	28,31
		$\nu$	0,15	0,22	0,23	0,25	0,27
4	«----«----«-16	$\mu$	8,20	9,27	11,15	11,74	12,54
		$\lambda$	4,59	4,21	7,51	10,76	14,81
		$\nu$	0,18	0,16	0,20	0,24	0,27
5	«----«----«-17	$\mu$	16,19	17,74	19,09	20,44	21,83
		$\lambda$	11,30	10,94	13,51	14,90	16,40
		$\nu$	0,21	0,19	0,21	0,21	0,22
6	Базальт-23	$\mu$	25,24	26,19	28,11	30,73	33,87
		$\lambda$	15,77	26,45	28,68	33,71	39,32
		$\nu$	0,19	0,25	0,25	0,26	0,27
7	Базальт-36	$\mu$	23,26	25,08	27,05	29,23	32,22
		$\lambda$	16,98	21,88	25,42	31,87	39,13
		$\nu$	0,21	0,23	0,24	0,26	0,27
8	Габбро-норит 39	$\mu$	43,94	47,93	50,19	52,68	55,58
		$\lambda$	45,89	65,89	70,71	74,43	79,43
		$\nu$	0,26	0,29	0,29	0,29	0,29
9	«----«----«-42	$\mu$	45,47	48,22	51,75	54,55	57,77
		$\lambda$	44,23	72,49	72,22	75,00	76,57
		$\nu$	0,25	0,30	0,29	0,29	0,29
10	«----«----«-43	$\mu$	44,56	47,30	48,02	50,70	53,78
		$\lambda$	40,28	63,14	69,63	72,32	81,32
		$\nu$	0,24	0,29	0,30	0,29	0,30
11	Лейкократовое габбро-40	$\mu$	36,35	37,61	39,16	40,79	44,25
		$\lambda$	49,66	61,74	66,66	71,65	75,45
		$\nu$	0,29	0,31	0,31	0,32	0,32

Таблица 4

Численные значения комбинированных модулей упругости второго порядка и коэффициента Пуассона для магматических пород при высоких давлениях. Неклассический подход б. Теория больших начальных и первый вариант теории малых начальных деформации

№№	Порода, номер образца, место отбора	Параметр	Значения упругих параметров при P (ГПа)				
			0,001	0,1	0,5	1,0	1,5
1	Анальцимовый базальт (Памир)-8	$\mu$	27,08	32,01	34,76	36,02	37,75
		$\lambda$	19,68	31,11	35,07	39,56	40,10
		$\nu$	0,21	0,25	0,25	0,26	0,26
2	Базальт	$\mu$	25,26	26,69	28,00	29,97	32,07
		$\lambda$	30,55	36,76	37,69	40,88	45,85
		$\nu$	0,27	0,29	0,29	0,29	0,29
3	Андезит (о. Кипр)-19	$\mu$	15,49	18,51	20,82	23,37	26,20
		$\lambda$	6,40	14,22	17,51	23,45	30,09
		$\nu$	0,15	0,22	0,23	0,25	0,27
4	«----«----«-16	$\mu$	8,20	9,33	11,50	12,46	13,64
		$\lambda$	4,59	4,23	7,78	11,54	16,44
		$\nu$	0,18	0,16	0,20	0,24	0,27
5	«----«----«-17	$\mu$	16,19	17,80	19,40	21,09	22,84
		$\lambda$	11,30	10,98	13,74	15,42	17,29
		$\nu$	0,21	0,19	0,21	0,21	0,22
6	Базальт-23	$\mu$	25,24	26,24	28,39	31,35	34,88
		$\lambda$	15,77	26,51	28,98	34,44	40,60
		$\nu$	0,19	0,25	0,25	0,26	0,27
7	Базальт-36	$\mu$	23,26	25,13	27,32	29,81	33,16
		$\lambda$	16,98	21,92	25,69	32,54	40,38
		$\nu$	0,21	0,23	0,24	0,26	0,27
8	Габбро-норит 39	$\mu$	43,94	47,97	50,41	53,14	56,30
		$\lambda$	45,89	65,95	71,02	75,10	80,50
		$\nu$	0,26	0,29	0,29	0,29	0,29
9	«----«----«-42	$\mu$	45,47	48,27	51,98	55,03	58,53
		$\lambda$	44,23	72,56	72,54	75,68	77,62
		$\nu$	0,25	0,30	0,29	0,29	0,29
10	«----«----«-43	$\mu$	44,56	47,37	48,25	51,17	54,53
		$\lambda$	40,28	63,20	69,96	73,02	82,51
		$\nu$	0,24	0,29	0,30	0,29	0,30
11	Лейкократовое габбро-40	$\mu$	36,35	37,65	39,34	41,15	44,83
		$\lambda$	49,66	61,80	66,97	72,31	76,49
		$\nu$	0,29	0,31	0,31	0,32	0,32

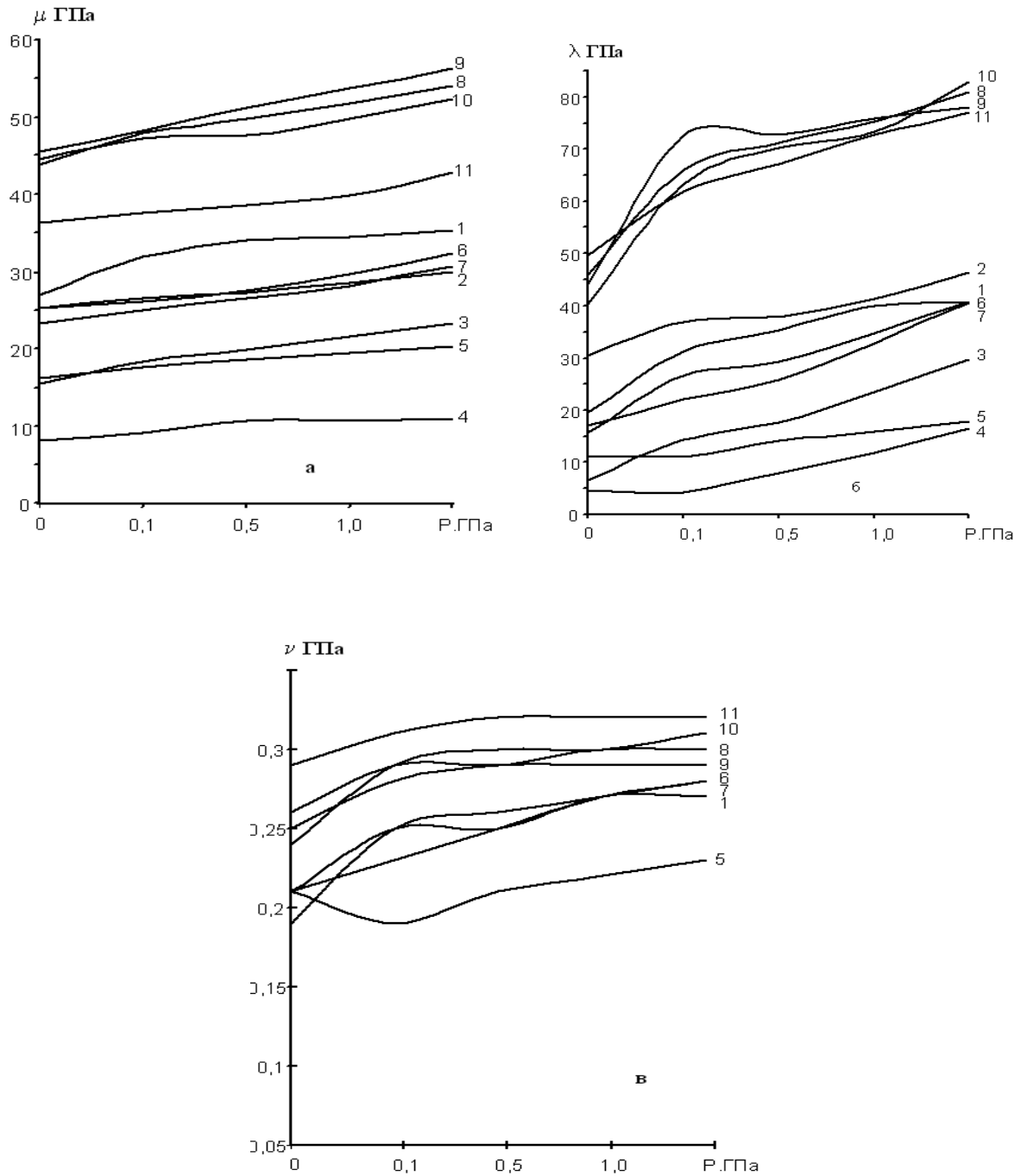




**Рис. 2.** Зависимость значений модуля сдвига (а); модуля сжатия (б) и коэффициента Пуассона (в) от давления для образцов габбро (8,9,10,11), базальтов (1,2,6,7), андезитов (3,4,5).

Неклассический подход.

1. В случае «натуральных» или «естественных» скоростей  
 а. Второй вариант теории малых начальных деформаций



**Рис. 3.** Зависимость значений модуля сдвига (а); модуля сжатия (б) и коэффициента Пуассона (в) от давления для образцов габбро (8,9,10,11), базальтов (1,2,6,7), андезитов (3,4,5).

Неклассический подход.

1. В случае «натуральных» или «естественных» скоростей
- б. Теория больших начальных и первый вариант теории малых начальных деформаций

**Выводы**

1. Полученные изменения величины коэффициента Пуассона для изотропных горных пород объясняются возможными вариациями вещественного состава литосферы Земли, а упругие модули – состоянием вещества.

2. Установлена связь модулей упругости и коэффициента Пуассона с минеральным составом и структурными особенностями (пористость, трещиноватость и др.) рассматриваемых горных пород.

3. Наибольшие величины значений упругих параметров характерны для основных пород, которые по сравнению со средними породами характеризуются более плотной упаковкой атомов в решетках порообразующих минералов.

**ЛИТЕРАТУРА**

ВОЛАРОВИЧ, М.П., БАЮК, Е.И., ЛЕВЫКИН, А.И., ТОМАШЕВСКАЯ, И.С. 1974. Физико-механические свойства горных пород и минералов при высоких давлениях и температурах. Наука. Москва. 223.

ГАСАНОВ, А.Б., САФАРОВ, И.Б. 1988. Термобарический эффект в значениях динамических модулей уп-

ругости и коэффициент Пуассона горных пород. *Изв. АН Аз.ССР. Науки о Земле*, 4, 116-122.

ДОРТМАН, Н.Б. (под ред.). 1992. Петрофизика: Справочник. Книга третья: Земная кора и мантия. Недра. Москва. 286.

ЖАРКОВ, В.Н., КАЛИНИН, В.А. 1968. Уравнения состояния твердых тел при высоких давлениях и температурах. Наука. Москва. 311.

КАЛИНИН, В.А. 2000. Свойства геоматериалов и физика земли (Избранные труды). ОИФЗ РАН, ISBN. Москва. 334.

КАЛИНИН, В.А., БАЮК, И.О. и др. 1993. Определение при высоких давлениях изотропных упругих модулей минералов по их осколкам. *Изв. РАН, Физика Земли*, 4, 30-37.

КИРЕЕНКОВА, С.М., САФАРОВ, И.Б. 1979. Одновременное определение скоростей продольных и поперечных волн в горных породах при высоких давлениях. *Изв. АН СССР, Физика Земли*, 12, 93-98.

КУЛИЕВ, Г.Г., ШИРИНОВ, Н.М. 2005. К определению второго порядка модулей упругости напряженных нелинейных изотропных сред. *Изв. НАНА, Науки о Земле*, 3, 10-16.

КУЛИЕВ, Г.Г., ШИРИНОВ, Н.М. 2006. К определению третьего порядка модулей упругости напряженных нелинейных изотропных сред. *Изв. НАНА. Науки о Земле*, 3, 31-35.

САФАРОВ, И.Б. 2003. Анизотропия упругих свойств горных пород при высоких термодинамических условиях и петрофизические модели литосферы. Автореф. док. дисс. ИГ НАНА. Баку. 47.

**Рецензент: д.г.-м.н. Ш.А.Балакишибейли**