

А. И. ФАРБЕРОВ, Л. Н. СОКОЛОВ, А. И. ЛЕВЫКИН,
С. И. ЗУБКОВ, В. А. ЕРМАКОВ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СКОРОСТИ
И ЗАТУХАНИЯ УЛЬТРАЗВУКА В ЧАСТИЧНО И ПОЛНОСТЬЮ
РАСПЛАВЛЕННЫХ ЭФФУЗИВАХ**

(Представлено академиком М. А. Садовским 2 VII 1974)

При исследованиях участков земной коры и мантии, где предполагается существование расплавов (астеносферные слои, магматические очаги вулканов и т. д.), широко используются сейсмические методы. Для интерпретации результатов сейсмических исследований важное значение приобретают акустические, вязкостные и др. свойства горных пород в интервале температур плавления. Известны публикации по изучению вязкости (^{1, 2}) и скорости продольных волн (^{3, 4}) в расплавленных горных породах при атмосферном давлении. Определение скорости распространения упругих волн проводилось на одной частоте. Попытка оценить затухание принята только для гомогенного расплава (⁴).

Нами впервые проведены измерения на нескольких частотах одновременно скоростей и затухания ультразвука в процессе расплавления эффузивов при атмосферном давлении. Исследовались типичные разновидности высокоглиноземистых пород известково-щелочного ряда андезитового и андезито-базальтового состава с содержанием SiO₂ 55–57%. Химический и минеральный состав изученных образцов приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический и минеральный состав образцов, об. %

	1380	1385	1387		1380	1385	1387
SiO ₂	55,58	54,78	57,20	Ol	5	2	—
TiO ₂	0,95	0,95	0,70	Px	10	3	4
Al ₂ O ₃	18,97	19,52	19,07	Pl	45	40	27
Fe ₂ O ₃	2,37	3,68	3,20	Amf	—	—	4
FeO	5,14	4,05	4,28	Om			
MnO	0,21	0,20	0,24	(Pl+Px+mt+gl)	40	55	65
MgO	4,14	3,41	3,07				
CaO	7,62	8,08	7,93				
Na ₂ O	4,17	4,11	3,70				
K ₂ O	0,96	0,80	0,60				
H ₂ O	0,36	—	0,31				
P ₂ O ₅	0,16	0,21	0,19				
	100,33	99,69	100,49				

Примечание: Ol — оливин, Px — пироксен, Pl — плагиоклаз, Amf — амфибол, Om — основная масса, mt — магнетит, gl — стекло.

Измерение скорости ультразвуковых волн v_p проводилось импульсно-фазовым методом на установке, подробно описанной ранее (⁵). Для определения коэффициента затухания продольных волн α_p использовался импульсный метод с переменной акустической базой. Относительная погрешность в определении v_p составляла 2–3%, а ошибка в определении α_p не

превышала 5—10%. Из-за наличия железа в образцах в качестве материала для звукопроводов и тигля использовался молибден. Для защиты молибдена от окисления и предотвращения возникновения окислительных процессов в рабочее пространство печи подавался инертный газ. Раздробленный материал погружался в тигель и нагревался до температуры 950—1000° С. Для обеспечения проведения замеров в условиях, близких к равновесным, т. е. при неизменном соотношении количества кристаллов и расплава, температура при каждом ультразвуковом измерении выдерживалась постоянной в пределах $\pm 10^\circ$ в течение 0,5—2 час. Значение температуры расплава определялось с помощью потенциометра ПП-63 по термопаре, опускаемой непосредственно в исследуемый расплав у середины торца звукопровода. Для изучения влияния длительного нагревания на химический и минералогический состав расплава проводился анализ образцов, закаленных при разных температурах. Содержание (в процентах) FeO и Fe₂O₃ колебалось незначительно (5,3—6,3 и 1,3—1,7 соответственно), что согласуется с малым содержанием воды в породах (см. табл. 1).

На рис. 1, 2 приведены результаты обработки полученных для трех исследованных образцов значений v_p и α_p в интервале температур 1000—1500° и данные по вязкости η в интервале 10^2 — $10^{3,7}$ пуаз, полученные нами при измерении на ротационном вискозиметре с вращающимся тиглем по стандартной методике (2). При более низких температурах значения η определены с использованием экстраполяционных зависимостей, приведенных в (6).

Исследованный температурный интервал кривых $v_p=f(T)$ и $\alpha_p=f(T)$ можно разделить на 2 участка — ниже и выше 1240°, где вещество находится соответственно в частично и полностью расплавленном состоянии.

Область частичного плавления характеризуется резким падением v_p , нормальной дисперсией скорости (используя терминологию (8)), наличием четких максимумов на кривых $\alpha_p=f(T)$, преимущественно нелинейным ростом α_p с частотой и аномальным смещением максимума α_p в сторону низких температур с ростом частоты ультразвука. Положение максимумов на кривых $\alpha_p=f(T)$ несколько сдвинуто от середины кривой к ее началу.

Наблюдаемые особенности в поведении скорости и затухания ультразвуковых волн не соответствуют предсказаниям релаксационной теории (7) и в целом отвечают характеру зависимостей этих параметров для микронеоднородных сред с диффузионными процессами обмена между компонентами (8). В качестве компоненты с упорядоченной структурой следует рассматривать нерасплавленные частички.

Однако полученная нами частотная зависимость $\alpha_p=f(T)$ для образцов, находящихся в частично расплавленном состоянии, отличается от предсказываемой теорией зависимости $\sim f^{1/2}$. По-видимому, существенно влияние рассеяния, особенно сильно сказывающееся на частоте 5 Мгц, при которой длина волны λ соизмерима с размерами кристаллов, плавающих в расплаве. Для более низкой из использованных частот 1,2 Мгц этот максимум существенно меньше по величине, что обусловлено меньшим эффектом рассеяния для волн, длина которых превышает размер зерен в 5—10 раз. Именно на этой частоте α_{max} располагается практически в начале дисперсионной кривой, что точно соответствует предсказаниям теории для сильновязких жидкостей.

При температурах выше 1300° значения v_p для всех расплавов становятся близкими по величине. Снижение скорости с ростом температуры приобретает линейный характер, температурный коэффициент скорости незначителен:

$$-\frac{1}{T} \cdot \frac{dv}{dT} \approx 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-1}.$$

Переход от резкого падения v_p к линейному участку соответствует области температур, где по данным минералогического анализа закален-

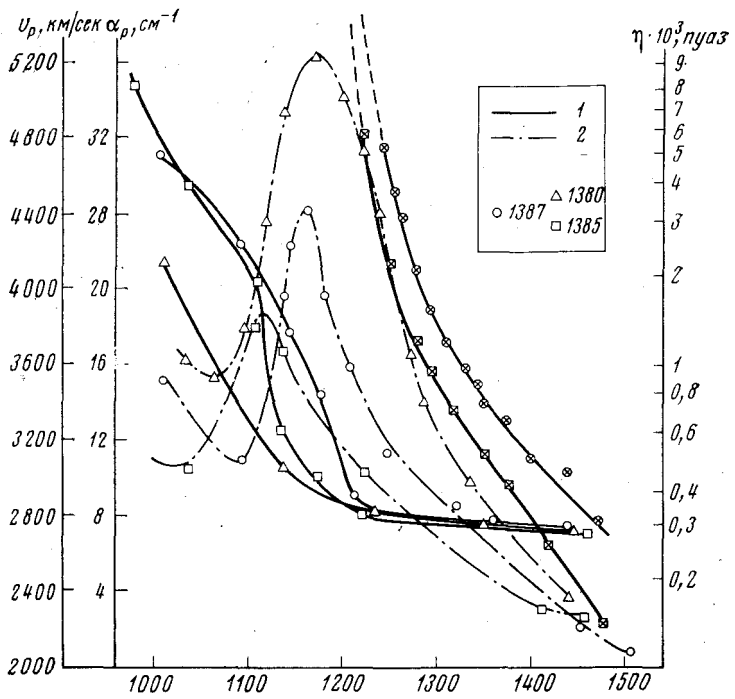


Рис. 1. Температурная зависимость скорости (1) и затухания (2) продольных волн, а также вязкости (кривые с крестиком) для образцов №№ 1380, 1385 и 1387

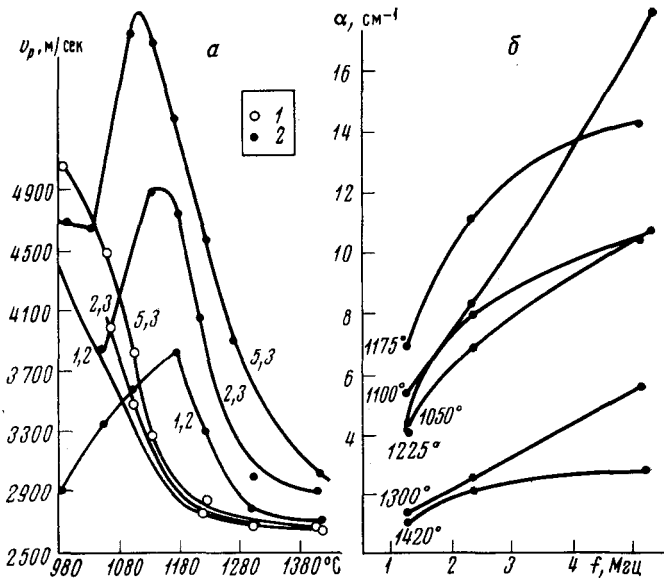


Рис. 2. а — Температурная зависимость скорости (1) и затухания (2) продольных волн в образце андезито-базальта № 1385 для частот 5,3; 2,3 и 1,2 Мгц (цифры у кривых). б — Частотная зависимость затухания продольных волн для различных температур (цифры у кривых)

ных образцов завершается расплавление последних остатков кристаллической фазы.

В этом же интервале температур наблюдался характерный перегиб на кривых $\eta=f(T)$ (см. рис. 1), обусловленный замедлением темпа падения вязкости после разжижения последних кристаллов, взвешенных в расплаве (⁴, ⁶). Затухание ультразвука в высокотемпературном расплаве, где нет кристаллов, пропорционально $f^{1/2}$ (см. рис. 2б), а не f^2 , как предполагается релаксационной теорией для жидкого состояния. Используя полученные значения α_p для образцов 1385 и 1387 рассчитали коэффициент эффективной вязкости расплава $\eta_{эф} = \frac{1}{3}\eta + \eta'$ (где η' — объемная вязкость) по формулам теории распространения акустических волн в сильновязких жидкостях (⁸). Для температуры 1420° $\eta_{эф} = 3,8 \cdot 10^3$ пуаз, а объемная вязкость расплава $\eta' = 3,5 \cdot 10^3$ пуаз. Выбор температуры полного расплавления для теоретической оценки вязкости по поглощению ультразвука обусловлен тем, что потери, связанные с рассеянием, здесь минимальны.

Таким образом, коэффициент объемной вязкости расплава оказался на порядок больше коэффициента сдвиговой вязкости (250—400 пуаз при 1420°). Это указывает на довольно высокую концентрацию в расплаве микровключений с упорядоченным строением даже при высоких температурах. Полученный результат хорошо согласуется с данными по расплавам солей (⁹).

Для геофизических целей важно знать v_p в расплаве при высоких давлениях на сейсмических частотах. Влияние давления до 8,5 кбар было оценено в (¹⁰). В расплавах эффузивов, близких по химическому составу к исследованным породам $v_p = 2450-2500$ м/сек на частоте 10^5 гц (³, ⁴). Экстраполяция значений, полученных нами и в работах (³, ⁴), в область более низких частот (1—10 гц) с учетом эффекта давления приводят к величинам v_p в расплаве 2,1—2,4 км/сек. Это значение весьма близко к рассчитанному по сейсмическим данным ($v_p = 1,9$ км/сек) для магматического очага Ключевского вулкана (¹¹).

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта
Академии наук СССР
Москва

Поступило
2 VII 1974

Институт вулканологии
Дальневосточного научного центра
Академии наук СССР
Петропавловск-Камчатский

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ М. П. Воларович, Журн. прикл. физ., т. 5, 185 (1928). ² М. П. Воларович, Тр. II Конфер. по экспериментальной петрографии, Изд. АН СССР, 1939, стр. 209.
³ T. Murase, T. Suzuk, Hokkaido Univ. Fac. Sci. J., Ser. VII, 2g, 273 (1966). ⁴ T. Murase, A. R. McBirney, Geol. Soc. Am. Bull., v. 84, 3563 (1973). ⁵ В. В. Байдов, М. В. Дымов и др., Ультразвуковая техника, № 2, 17 (1965). ⁶ H. R. Shaw, J. Petrology, v. 10, 510 (1969). ⁷ М. А. Леонтович, Л. И. Мандельштам, ЖЭТФ, т. 7, 438 (1937).
⁸ М. А. Исакович, И. А. Чабан, ЖЭТФ, т. 50, в. 5, 1343 (1966). ⁹ Т. Лиговиц, К. Девис, В кн. Физическая акустика, т. 2, ч. А, Свойства газов, жидкостей и расплавов, М., 1968, стр. 298. ¹⁰ V. K. Ablordeppey, Phys. Rev., A, v. 3, № 5, 10680 (1967).
¹¹ Г. С. Горшков, ДАН, т. 106, № 4 (1956).