

Член-корреспондент АН СССР В. А. ЖАРИКОВ, И. П. ИВАНОВ,  
Ю. А. ЛИТВИН, Р. А. ИШБУЛАТОВ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАВЛЕНИЯ  
ИЗВЕРЖЕННЫХ ПОРОД ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНОЙ СЕРИИ  
ПРИ ДАВЛЕНИИ 35 КБАР**

Экспериментальными исследованиями Т. Грина и А. Рингвуда (1) по плавлению и кристаллизации безводных стекол, отвечающих по составу кварцевому толеиту, андезитовому базальту, андезиту, дациту и риодациту (адамеллиту), схематически были намечены положения кривых ликвидуса и солидуса этих разновидностей пород в интервале давлений 18—36 кбар. Было показано, в частности, что минимум температуры ликвидуса при давлениях 27—36 кбар приходится на андезитовый состав. Изучение проблем глубинного магмообразования настоятельно требует систематических экспериментальных исследований плавления различных типов изверженных пород, особенно в направлении выявления зависимости от давления и состава положения кривой солидуса и последовательности кристаллизации минералов.

В настоящей работе сообщаются результаты экспериментального изучения плавления при давлении 35 кбар базальтов, андезитов, дацитов и липаритов, состав которых близок к средним составам этих пород по А. Н. Заварицкому (2). Исходным материалом служили природные образцы, любезно предоставленные нам А. В. Гуциным. Состав пород показан в табл. 1. Породы измельчали до фракции <0,07 мм и обезвоживали прокаливанием в инертной атмосфере при  $T=1100^{\circ}\text{C}$ . Перед капсулированием порошок просушивали при  $125-150^{\circ}\text{C}$  в течение часа.

Эксперименты выполнены в аппарате НЛ (наковальня с лункой) (3). Исследуемое вещество герметически заваривали в платиновую капсулу (диаметр 4 мм, стенка 0,1 мм, емкость 30 мг), которую помещали в полости держателя образца из гексагонального нитрида бора (см. рис. 1). Держатель образца заполняет внутреннее пространство безградиентного высокотемпературного реактора. Реактор смонтирован в комбинированном контейнере (пиррофиллит неотожженный, литографский камень).

Таблица 1

Химический состав исследованных образцов (%)

Компонент	№ 1					№ 2					
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	
SiO <sub>2</sub>	50,81	62,42	66,99	76,22	64,65	MgO	8,07	3,33	1,92	0,16	2,45
TiO <sub>2</sub>	0,99	0,72	0,57	0,06	0,60	CaO	9,76	4,92	3,42	0,75	4,59
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,27	16,99	15,54	12,94	15,80	Na <sub>2</sub> O	3,38	4,26	3,99	4,09	3,82
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,46	2,16	3,05	0,45	1,64	K <sub>2</sub> O	1,81	1,94	3,36	4,82	3,73
FeO	3,72	2,99	0,82	0,45	2,46	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,60	0,20	0,32	0,03	0,13
MnO	0,13	0,07	0,02	0,03	0,10						

Примечание. Образцы из коллекции А. В. Гуцина (Кавказ). № 1 — базальт, р. Раздолье; № 2 — андезит, г. Казбеги; № 3 — дацит, г. Эльбрус; № 4 — липарит, вулкан Артени; № 5 — гранодиорит Тырны-ауз. Химические анализы выполнены в лаборатории силикатного анализа Киевского университета. Пересчитаны на 100% после удаления воды.

Ячейка является элементом методики исследования фазовых равновесий в силикатных системах до 50 кбар и 1600°С с точностью ±1 кбар и ±5° (4). Экспериментально показано, что при комнатной температуре распределение давления на границе капсулы с образцом не хуже ±0,5 кбар, распределение температуры в объеме образца не хуже ±5°. В каждом опыте давление измеряется при комнатной температуре Вi—Тl-датчиками, подобно (5), температура — платино-родиевой термопарой (Pt30Rh/Pt6Rh). Для определения давления при высоких температурах произведена калибровка аппарата по кривой равновесия кварц-коусит. Сравнение полученной кривой ( $P, \text{ кбар} = 22,5 + 0,010T, \text{ } ^\circ\text{C}$ ) с наиболее достоверными (6, 7), показало, что точность измерения давления при высоких температурах ±1 кбар. Процедура эксперимента двухстадийная: предварительное сжатие (до 28 кбар) и нагрев до заданной температуры, дожатие до заданного давления (35 кбар). Температура контролируется в течение всего эксперимента и регулируется при помощи автоматической системы (8) с точностью ±0,06%. Закалка под давлением от температуры 1500—1600 до 300—400° за 3—5 сек. Продолжительность опытов 1 час. Для идентификации и оценки относительных содержаний кристаллических фаз и стекла применяли оптические и рентгенофазовый методы. При установлении солидуса небольшие количества стекла диагностировали в иммерсии методом фокального экранирования.

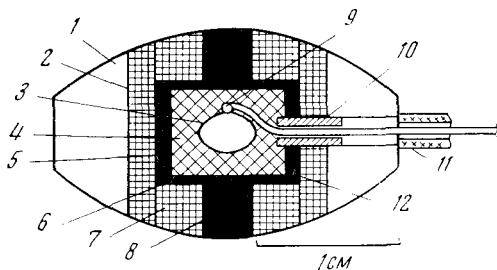


Рис. 1. Ячейка сверхвысокого давления. 1 — деталь контейнера (литографский камень); 2 — деталь контейнера (пиррофиллит); 3 — исследуемый образец в капсуле (платина); 4 — держатель образца (нитрид бора); 5 — трубчатая деталь реактора (графит); 6 — пластинчатая деталь реактора (графит); 7 — диэлектрическая деталь электропровода (пиррофиллит); 8 — проводящая деталь электропровода (графит); 9 — спай термопары (Pt30Rh/Pt6Rh); 10, 11 — электроизоляторы термопары (алунд полихлорвинил); 12 — датчик давления (Vi, Tl)

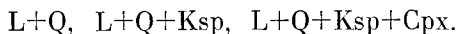
При установлении солидуса небольшие количества стекла диагностировали в иммерсии методом фокального экранирования.

Результаты экспериментального изучения плавления пород при давлении 35 кбар приведены на рис. 2. На диаграмме температура-содержание SiO<sub>2</sub> представлены экспериментальные точки, показывающие фазовый состав системы при соответствующей температуре. Ниже кратко охарактеризованы соотношения, установленные для выбранных исходных составов пород. Породы базальтового состава характеризуются узким интервалом плавления  $T_{\text{пл}} = 1545^\circ - T_{\text{сол}} = 1510 = 35$  кбар. Единственная кристаллическая фаза субликвидуса — клинопироксен, выделяющийся во всем интервале плавления. Пироксен составляет единственную (!) фазу субсолидуса до температуры 1410°, при которой в результате распада твердого раствора появляется гранат (линия 8 на рис. 2). Верхний температурный предел устойчивости граната был проверен специальными опытами, в которых в качестве исходной смеси использовался базальт, раскристаллизованный при иных параметрах (30 кбар, 1200°, 2 часа) в гранатосодержащую ассоциацию. Во всех случаях гранат в этих опытах исчезает при  $T > 1410^\circ\text{C}$  и остается стабильным при  $T < 1410^\circ$ . Для сопоставления было проведено плавление базальта с «естественным» содержанием воды (отвечающей кристаллизационной воде исходного базальта). Присутствие даже незначительного количества воды (1,2%) заметно понижает температуру плавления породы базальтового состава ( $T_{\text{пл}} = 1425^\circ$ ,  $T_{\text{сол}} = 1310^\circ$ ) и расширяет область субликвидуса (см. линии 6 и 7, на рис. 2). Последовательность кристаллизации минералов для водосодержащего базальта  $L \rightarrow L + \text{Cpx} \rightarrow L + \text{Cpx} + \text{Ga}$ . В субсолидусе базальт сложен эклогитовым двухминеральным парагенезисом  $\text{Cpx} + \text{Ga}$ .

Кристаллизация расплава андезитового состава начинается при  $1340^{\circ}$ . Первая выделяющаяся фаза — клинопироксен. С температуры  $1340^{\circ}$  вместе с пироксеном кристаллизуется кварц. Температура солидуса  $1290^{\circ}$ . В области субсолидуса ( $T=1200^{\circ}$ С) породы андезитового состава сложены клинопироксеном и кварцем.

Температура ликвидуса расплава дацитового состава  $1370^{\circ}$ , температура солидуса  $1265^{\circ}$ . Первым субликвидусным минералом является кварц. С температуры  $1340^{\circ}$  до солидуса вместе с кварцем кристаллизуется пироксен. Кроме кварца и пироксена (до температуры  $1000^{\circ}$ ) в субсолидусе других фаз не обнаружено. Для проверки возможной стабильности граната в исходную шихту были внесены затравки природного граната (близкого по составу к пиропу) в количестве 5 и 10 вес.%. В продуктах опытов, проведенных при  $1000^{\circ}$  и  $1200^{\circ}$  (продолжительность 1–3 часа), гранат не обнаружен.

Температуры кристаллизации липаритового расплава заметно выше, чем у дацитового:  $T_{\text{лиг}}=1435^{\circ}$ ,  $T_{\text{сол}}=1340^{\circ}$ . Единственная субликвидусная фаза — кварц, к которой на солидусе присоединяется клинопироксен. Кроме того, в породе частично сохраняется исходное стекло. Однако оно оптически очень четко отличается от вновь образованного закаленного стекла, поэтому полученные параметры ( $T_{\text{лиг}}$ ,  $T_{\text{сол}}$ ) достаточно надежны. Отсутствие калиевых минералов в продуктах раскристаллизации липаритов объясняется трудностью их кристаллизации из содержащего калий стекла, которое сохраняется в липаритах. Для подтверждения этих предположений были проведены опыты по плавлению и кристаллизации гранодиоритов (обр. № 5, табл. 1), которые показали  $T_{\text{лиг}}=1455^{\circ}$ ,  $T_{\text{сол}}=1300^{\circ}$  и фазовые соотношения в области субликвидуса:



Сопоставление данных по температурам плавления и кристаллизации дает возможность наметить положение кривых ликвидуса и солидуса для изверженных пород щелочноземельной серии. На диаграмме (рис. 2), которая представляет собой как бы псевдобинарную диаграмму плавкости, кроме фазового состава изученных образцов, в зависимости от температуры показаны: а) кривые ликвидуса (1) и солидуса (2) для пород ряда андезит-липарит по нашим данным; б) кривая ликвидуса (3) по данным Т. Грина и А. Рингвуда (соответствующие ей составы обозначены как I—V); в) температуры ликвидуса и солидуса сухого базальта (4 и 5) и базальта с «естественным» содержанием воды (6 и 7); г) линия распада  $Cpx \rightarrow Ga + Cpx$  в субсолидусе для базальтового состава (8).

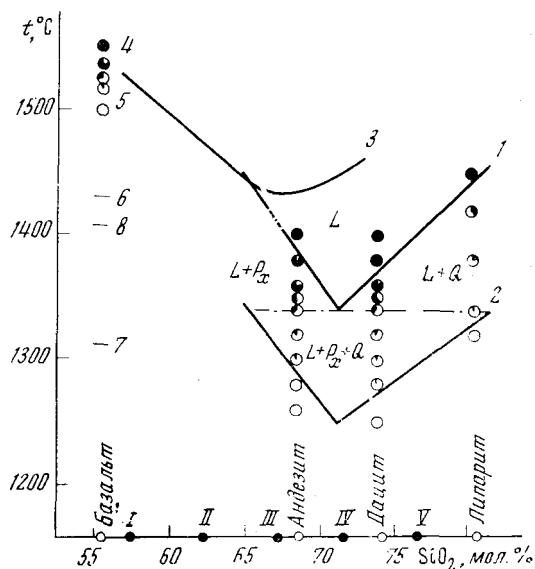


Рис. 2. Положение кривых ликвидуса, солидуса и фазовые соотношения для изверженных пород щелочноземельной серии в координатах  $T-SiO_2$  при давлении 35 кбар. Экспериментальные точки обозначены кружками (площадь черного сектора пропорциональна количеству стекла в закаленном образце)

Проведенные нами исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Минимум температуры плавления пород щелочноземельной серии приходится на дацитовые составы (содержание  $\text{SiO}_2$  70—72 мол. %). При этом минимум плавления располагается между исследованными составами дацита и андезита, поскольку они отличаются порядком кристаллизации минералов; именно для дацитового состава  $L+Q \rightarrow Q+\text{Crx}$ , для андезитового состава  $L+\text{Crx} \rightarrow \text{Crx}+Q$ . Температура минимума ликвидуса  $1345^\circ\text{C}$ .

2. Устанавливается чрезвычайно широкая изоморфная емкость пироксенов при давлении 35 кбар. Так, весь базальтовый состав в высокотемпературном субсолидусе «умещается» в пироксен, состав которого в этом случае можно выразить следующим образом:



Формула соответствует изоморфной смеси четырех минералов: жадеитового, салитового, энстатитового и молекулы Чермака. Только при понижении температуры этот пироксен распадается с выделением граната. Пироксены андезитов — дацитов — липаритов относятся к насыщенным кремнеземом членам ряда жадеит-клинопироксен. Из приведенных данных следует, что при давлении 35 кбар эти пироксены образуют непрерывный твердый раствор с минимумом в области «дацитовых» составов.

3. Можно предполагать, что при давлении 35 кбар базальтовый состав (№ 1) не попадает на монотонную поверхность ликвидуса с кварцсодержащими андезитами, а отделен от них пироксеновым максимумом (который, видимо, приходится при данном содержании щелочей на 58—63 мол. %  $\text{SiO}_2$ ). Кристаллизация базальтов происходит в области эклогитовых парагенезисов, образующих при этих давлениях обширные твердые растворы между клинопироксенами и гранатом. Незначительная разница в  $T_{\text{лиг}}$  и  $T_{\text{сол}}$  исследованного нами базальта указывает на пологие формы соответствующих поверхностей в области данного состава.

Институт экспериментальной минералогии  
Академии наук СССР  
Черноголовка Московской обл.

Поступило  
12 VII 1973

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> T. H. Green, A. E. Ringwood, Earth Planet. Sci. Letters, v 1, 5, 307 (1966). <sup>2</sup> А. Н. Заварицкий, Изверженные горные породы, Изд. АН СССР, М., 1961. <sup>3</sup> Л. Ф. Верещагин, Пат. Бельгии № 760788 от 29 апреля 1971. <sup>4</sup> Ю. А. Литвин, Р. А. Ишбулатов, В сб.: IX Всесоюз. совещ. по экспериментальной и технической минералогии и петрографии (тез. докл.), Иркутск, 1973. <sup>5</sup> А. В. Герасимович, Э. Б. Вишневский, А. Ф. Ляшенко, Синтетические алмазы, т. 3, 4 (1973). <sup>6</sup> И. А. Островский, Изв. АН СССР, сер. геол., т. 10, 12 (1973). <sup>7</sup> S. Kitahara, G. S. Kennedy, J. Geophys. Res., v. 69, 24, 5395 (1964). <sup>8</sup> Е. П. Ступаков, Ю. А. Литвин, Приборы и техника эксп., т. 5, 225 (1973).