

В. Н. АНФИЛОВ, В. А. АБРАМОВ, В. И. КОВАЛЕНКО,  
В. Я. ОГОРОДОВА

**ФАЗОВЫЕ ОТНОШЕНИЯ В АГПАИТОВОЙ ОБЛАСТИ СИСТЕМЫ  
 $\text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$  ПРИ ДАВЛЕНИИ 1000 кг/см<sup>2</sup>**

(Представлено академиком Д. С. Коржинским 19 IV 1971)

Особенности фазовых отношений в агпаитовой области системы  $\text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$  имеют большое значение для решения вопросов генезиса агпаитовых редкометалльных гранитов, пегматитов, нефелиновых сиенитов и других щелочных пород. В связи с этим объектом наших исследований являлась часть системы от состава, близкого к тройному минимуму в системе  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 - \text{KAlSi}_3\text{O}_8 - \text{SiO}_2$  (1), до составов, значительно обогащенных  $\text{Na}_2\text{O}$ . В качестве шихты брали природный аляскинский гранит (2), к которому добавляли раствор  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  с начальными концентрациями 1; 2; 3; 5; 8 и 11 вес.%. Опыты вели в запаянных золотых ампулах на установке с внешней поддержкой давления. Отношение веса шихты к весу раствора во всех опытах было равным 1:10. Вес шихты в зависимости от коэффициента заполнения ампул менялся от 200 до 400 мг. Температуру в процессе опытов поддерживали с точностью  $\pm 5^\circ$ , давление  $1000 \pm 15$  кг/см<sup>2</sup>. После опыта реактор закаливали в воде. Продолжительность опытов, установленная по кинетическим исследованиям, составляла 7 суток (2). Стабильность фазовых

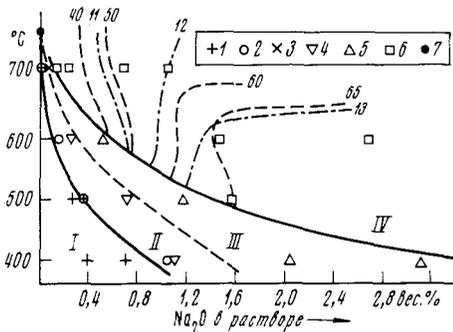


Рис. 1. Фазовые отношения в системе  $\text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$  (разрез гранит —  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 - \text{H}_2\text{O}$  при 1000 кг/см<sup>2</sup>). I—IV — номера полей. 1 — Кв + Аб + Мк + Ф; 2 — Кв + Аб + Мк + р<sub>1</sub> + Ф; 3 — Кв + Аб + Мк + р<sub>2</sub> + р<sub>1</sub> + Ф; 4 — Аб + Мк + р<sub>1</sub> + Ф; 5 — Аб + р<sub>1</sub> + р<sub>2</sub> + Ф; 6 — р<sub>1</sub> + р<sub>2</sub> + Ф; 7 — начало плавления гранита с чистой водой

отношений проверяли подходом к исследуемой точке «снизу» и «сверху». Диагностику фаз производили рентгенографическим методом на дифрактометре ДРОН-1, а также оптическими методами. Растворы, гомогенные стекла и тяжелую фазу отдельно анализировали методами стандартного химического силикатного анализа. Содержание воды в стекле и тяжелой фазе определяли по величине потерь при прокаливании.

Результаты опытов в виде фазовой диаграммы в координатах температура — равновесная концентрация  $\text{Na}_2\text{O}$  в растворе (флюиде) представлена на рис. 1. Четыре поля диаграммы характеризуются следующими фазами: I — кварц (Кв) + альбит (Аб) + микроклин (Мк) + флюид (Ф); II — Аб + Мк + Ф + расплав (р<sub>1</sub>); III — Аб + Ф + р<sub>1</sub> + тяжелая жидкая фаза (р<sub>2</sub>); IV — Ф + р<sub>1</sub> + р<sub>2</sub>. В поле III в некоторых точках сохраняются редкие зерна микроклина. Поэтому граница между полями II и III показана условно и проведена пунктиром.

Необходимо отметить, что область существования двух полевых шпатов, показанная на рис. 1, поднимается выше кривой субсолидуса, предложенной Орвилем (3). Возможно, это связано с тем, что в наших опытах не достигнуто твердофазное равновесие (это, впрочем, с равным основа-

нием можно сказать относительно опытов Орвиля (3)). Поэтому вопрос о положении максимума субсолидуса щелочных полевых шпатов в рассматриваемой системе пока следует считать открытым.

В поле IV показаны изоконцентраты воды в фазах  $p_1$  и  $p_2$ . Цифрами указаны их значения (вес. %).

Не останавливаясь на свойствах кварца, альбита и микроклина, которые близки к приводимым в справочниках, опишем подробнее особенности жидких фаз. Расплав ( $p_1$ ) после закалки представляет собой прозрачное однородное стекло с показателем преломления от 1,4870 до 1,5230, возрастающим с ростом концентрации  $\text{Na}_2\text{O}$  во флюиде. Содержание воды в расплаве меняется от 9,59 до 20,1 вес. % (табл. 1) и увеличивается с ростом содержания  $\text{Na}_2\text{O}$  во флюиде. В области содержания  $\text{Na}_2\text{O}$  во флюиде  $< 1$  вес. % содержание воды в расплаве не зависит от температуры. При больших концентрациях  $\text{Na}_2\text{O}$  содержание воды с повышением температуры несколько уменьшается. При наиболее низких содержаниях  $\text{Na}_2\text{O}$  во флюиде при  $700^\circ$  концентрации щелочей, алюминия и кремния в расплаве приближаются к их значениям в аляскитовых гранитах (см. табл. 1).

Фаза  $p_2$  по свойствам близка к «тяжелой фазе», описанной в литературе (4, 5). Для того чтобы проверить, стабильна ли эта фаза в изучаемых условиях, были проведены специальные опыты. В основной ампуле подвешивалась ампула меньшего диаметра с перфорированными стенками для захвата продуктов закалки (рис. 2). В двух опытах шихта помещалась на дно большой ампулы, причем в одном из них в дне перфорированной ампулы имелось отверстие, через которое тяжелая фаза могла стекать в большую ампулу при условии, если она возникает во всем объеме раствора. В третьем опыте шихта помещалась на дно перфорированной ампулы. Распределение продуктов в этих трех опытах показало, что фаза  $p_2$  образуется только в контакте с шихтой, а к продуктам закалки относится белый пемзовидный материал, найденный во всех опытах и в перфорированной, и в большой ампулах (рис. 2). Поэтому пемзовидный материал после опыта отделяли и возвращали в раствор для химического анализа.

После закалки тяжелая фаза представляет собой гель с содержанием воды от 28,44 до 69,15 вес. % (см. табл. 1). Содержание воды в ней уменьшается с увеличением температуры и уменьшением  $\text{Na}_2\text{O}$  во флюиде. Существующие жидкости  $p_1$  и  $p_2$  наиболее резко отличаются только по содержанию воды. Соотношения кремнезема, глинозема и щелочей колеблются в них в довольно узких пределах (рис. 3). В области низких содержаний  $\text{Na}_2\text{O}$  во флюиде при повышении температуры составы и свойства расплава и тяжелой фазы сближаются. Весьма вероятно, что в поле II (рис. 1) понижение содержания  $\text{Na}_2\text{O}$  приводит к исчезновению эффекта расслоения. Повышение концентрации  $\text{Na}_2\text{O}$  приводит к сближению составов фаз  $p_2$  и  $\Phi$  так, что в области еще больших концентраций  $\text{Na}_2\text{O}$  возможен непрерывный переход  $p_2$  во флюид.

Флюид представляет собой водный раствор силиката натрия. При низких концентрациях  $\text{Na}_2\text{O}$  он, практически, содержит только  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{SiO}_2$  в соотношении, близком к  $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ . С повышением содержания  $\text{Na}_2\text{O}$  это соотношение смещается в сторону  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  и флюид обогащается калием и глиноземом (см. табл. 1).

Установленные фазовые отношения показывают, что при высоких коэффициентах агаитности в системе начало плавления гранита наблюдается при значительно более низких температурах, чем для системы гранит —  $\text{H}_2\text{O}$ . В этих условиях из расплава одновременно могут кристаллизоваться

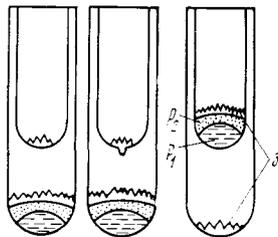


Рис. 2. Распределение фаз в опыте для определения стабильности тяжелой фазы.  $p_1$  — расплав,  $p_2$  — тяжелая фаза,  $z$  — продукты закалки

Таблица 4

## Составы сосуществующих жидких и флюидной фаз (%)

T, °C	Содержание Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> , вес. % в исходном растворе	Раствор (Ф)					Тригидратная фаза (P <sub>2</sub> )					Расплав (P <sub>1</sub> )					
		Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O (н.п.п.)	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O (н.п.п.)	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O (н.п.п.)	
500	1	0,27	0,04	0,047	1,11	98,53											
	2	0,34	0,08	0,071	1,35	98,16											
	3	0,35	0,08	0,077	1,31	98,18											
	5	0,72	0,08	0,220	2,42	96,56	5,49	0,70	2,02	27,46	62,28	18,85	2,76	8,67	55,05	9,59	
	8	1,17	0,19	0,440	2,35	95,85	5,84	0,78	3,07	25,00	64,63	20,56	2,32	4,94	50,98	14,25	
600	11	1,54	0,19	0,530	2,14	95,60	7,07	0,87	2,73	26,22	64,76	27,55	2,27	4,09	45,42	20,01	
	1	0,08	0,02	0,03	0,18	99,69											
	2	0,12	0,06	0,06	0,25	99,51											
	3	0,27	0,07	0,07	0,61	98,98											
	5	0,51	0,07	0,07	1,13	98,22	12,23	2,11	4,95	40,06	39,36	18,35	2,51	7,82	57,50	10,46	
700	8	1,46	0,16	0,12	4,05	94,21	7,40	1,01	3,84	21,85	65,94	22,39	2,28	5,78	52,90	13,10	
	11	2,68	0,21	0,40	5,94	90,77	7,63	0,60	2,70	20,10	67,84	25,15	2,25	4,90	50,10	13,90	
	0,5	0,02	0,012	0,61	0,19	99,17											
700	1	0,02	0,012	0,73	0,22	99,02											
	2	0,07	0,026	0,74	0,24	98,93											
	3	0,10	0,021	0,72	0,30	98,86	3,26	0,46	7,22	62,00	28,44	10,98	2,80	8,56	63,87	8,46	
	5	0,22	0,042	0,71	0,36	98,67	10,02	1,81	5,56	43,80	35,97	14,15	2,24	6,83	62,53	10,46	
	8	0,67	0,065	1,82	0,69	96,76	7,69	1,04	4,01	29,41	55,71	17,66	1,67	6,27	59,83	11,39	
	11	1,04	—	1,93	0,93		6,54	0,54	2,16	17,61	69,15	20,27	1,20	5,25	56,32	12,68	

два щелочных полевых шпата, парагенезис которых характерен для редкометальных щелочных гранитоидов. Понятно, что экспериментально изученные соотношения фаз, особенно при высоких концентрациях  $\text{Na}_2\text{O}$  в исходном растворе, если и могут реализоваться в природе, то только в наиболее поздних восточных порциях пегматитовых щелочногранитных магм. Однако, судя по составам более широко распространенных ще-

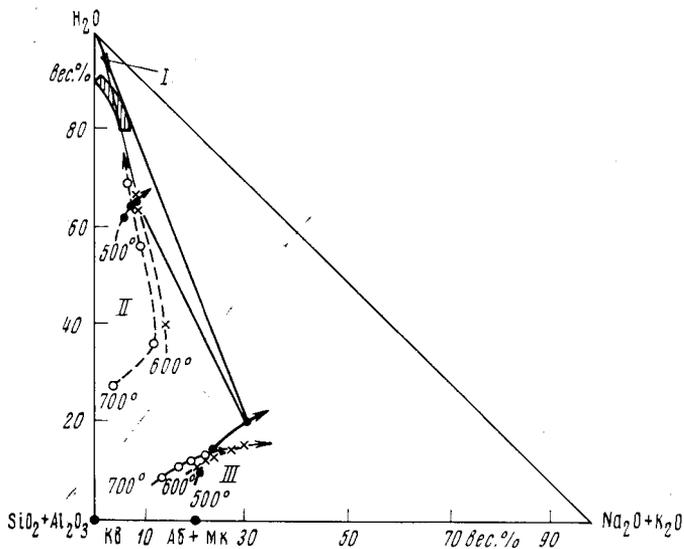


Рис. 3. Составы расплава, тяжелой фазы и флюида при 500; 600 и 700°. I — область составов флюида, II — тяжелой фазы, III — расплава.

Заштрихованный участок отвечает изученным составам системы. Коннодами соединены составы сосуществующих жидких и флюидной фаз при 500° и 1,5 вес. %  $\text{Na}_2\text{O}$  в растворе

лочных гранитов, натровых риолитов и щелочногранитных пегматитов, концентрации  $\text{Na}_2\text{O}$  до 0,3 вес. % во флюиде при их формировании кажутся правдоподобными. При понижении температуры в этой области может наступить расслоение гранитного расплава. Значение такого расслоения в природе пока оценить трудно, так как составы сосуществующих жидких фаз в опытах отличаются главным образом по содержаниям воды. Не ясно, как распределяется между ними такой существенный компонент природных щелочных гранитов, как железо, а также многие редкие элементы (цирконий, редкие земли, ниобий и т. п.). От характера их распределения будет зависеть, окажутся ли сходными по составу породы при раздельной кристаллизации этих жидких фаз или нет. Подчеркнем также, что одним из условий ликвации в рассматриваемых магмах, очевидно, должен быть избыток воды. Поэтому в эффузивных аналогах щелочных гранитов, кристаллизующихся, по-видимому, из относительно сухих магм, этот процесс менее вероятен, чем для щелочных пегматитов или редкометальных гранитов. В целом же кристаллизация и эволюция расплава в области концентраций  $\text{Na}_2\text{O}$  во флюиде 0,1—0,3 вес. % вполне соответствует эволюции природных парагенезисов щелочных гранитоидов.

Авторы пользуются случаем выразить благодарность В. А. Жарикову и И. П. Иванову за ценные замечания, сделанные при ознакомлении с рукописью работы.

Институт геохимии  
Сибирского отделения Академии наук СССР  
Иркутск

Поступило  
13 IV 1971

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> O. F. Tuttle, N. L. Bowen, Geol. Soc. Am. Mem., 74 (1958). <sup>2</sup> В. А. Абрамов, В. Н. Анфилов и др., Тр. VIII Всесоюз. совещ. по экспериментальной и технической минералогии и петрографии, «Наука», М., 1971. <sup>3</sup> Ph. M. Ogville, Am. J. Sci., 261, № 3 (1963). <sup>4</sup> В. П. Бутузов, Л. В. Брятов, Кристаллография, 2, № 5 (1957). <sup>5</sup> И. П. Иванов, В кн.: Экспериментальные исследования в области глубинных процессов, Изд. АН СССР, 1962.