

УДК 550.89+552.111+550.442+550.441

ПЕТРОГРАФИЯ

В. М. ИВАНОВ, Е. Ф. ДОИЛЬНИЦЫН, Ю. Г. ЛАВРЕНТЬЕВ, В. Н. КОРОЛЮК

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
МОЛЕКУЛЯРНО-ИОННО-ГРАВИТАЦИОННОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ  
БАЗАЛЬТОИДНЫХ РАСПЛАВОВ**

(Представлено академиком Ю. А. Кузнецовым 16 VII 1973)

Для объяснения наблюдаемых в природе закономерностей эволюции состава магм, а также процессов формирования расслоенных дифференцированных плутонов, советскими и зарубежными геологами (<sup>2, 5-7, 14</sup>) были выдвинуты различные гипотезы. В ряде из них среди различных механизмов дифференциации вещества магматических расплавов, таких как кристалло-гравитационный, газово-гравитационный, ликвидо-гравитационный (<sup>3</sup>) и др., одним из возможных предполагается механизм молекулярно-ионно-гравитационной дифференциации, т. е. жидкостной дифференциации гомогенных магматических расплавов в гравитационном поле Земли (<sup>2, 5, 6, 8, 14</sup>). Однако, как всякая гипотеза, и этот механизм дифференциации, несмотря на многочисленность его сторонников, будет оставаться лишь теоретическим предположением до тех пор, пока такой процесс не будет хотя бы приближенно воспроизведен в системе, близкой по составу к природным магматическим расплавам, а не с растворами солей и сплавами (<sup>7</sup>), строение которых, безусловно, иное.

Чтобы выяснить, возможна ли в принципе дифференциация магмы в гомогенном состоянии, нами был проведен эксперимент по центрифугированию безводных силикатных расплавов базальтоидного состава. Для этой цели была использована высокотемпературная центрифуга с рабочей температурой до 1700°; среда инертная (аргон); развиваемое ускорение ~1000 g.

Порошок исследуемой породы (см. табл. 1) засыпался в тигель и помещался в печь, закрепленную на роторе центрифуги. После нагрева и часовой выдержки системы при заданной температуре (1400—1700°) включался ротор центрифуги. Температура расплава в процессе центрифугирования поддерживалась постоянной. После 30 мин. центрифугирования система быстро охлаждалась, и расплав переходил в стекло.

Таблица 1

Исходный состав исследованных пород (%)

№№ п.п.	№ опыта	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Σ
1	5—70*	53,16	1,63	14,70	6,56	8,42	0,23	2,09	8,40	3,21	1,60	100,0
2	9—70*	58,67	0,77	18,20	6,00	1,73	0,23	3,20	4,51	5,40	1,29	100,0
3	8—70*	55,75	1,32	13,40	4,87	5,13	0,15	7,22	8,75	2,43	0,98	100,0
4	Va—69	51,60	—	19,40	—	—	—	14,50	12,1	2,30	0,10	100,0
5	11—70	60,22	0,49	18,30	0,68	2,59	0,14	0,79	1,82	4,34	8,85	98,22

Примечание. № 1 — базальт; № 2 — смесь двух пород: 5 частей андезито-базальта, обр. № 2119 (<sup>1</sup>) и 1 часть липаритового порфира, обр. № 6807 (<sup>1</sup>); № 3 — мезобазальт, обр. № 494/3 (<sup>1</sup>); № 4 — искусственное стекло толеитового состава; № 5 — трахитовый порфир, обр. № 492/21 (<sup>1</sup>). Анализы, отмеченные звездочкой, пересчитаны на сухой остаток и приведены к 100%.

По окончании экспериментов образцы полученных стекол разрезались вдоль их продольной оси и анализировались на электронном микронзонде MS-46 фирмы «Самеса» сканированием по линии от дна колонки стекла к верху ее. Результаты анализов записывались самописцем микронзонда в виде диаграмм, одна из которых приведена на рис. 1. Затем по этой же линии, на различных уровнях от дна ампулы определялись абсолютные содержания главных петрогенных элементов. Результаты анализов и пересчитанные их значения даны в табл. 2 и на рис. 2.

Данные экспериментов показывают, что существенное действие сильного гравитационного поля на силикатные расплавы (на их элементарные компоненты) систематически проявлялось лишь в перераспределении по

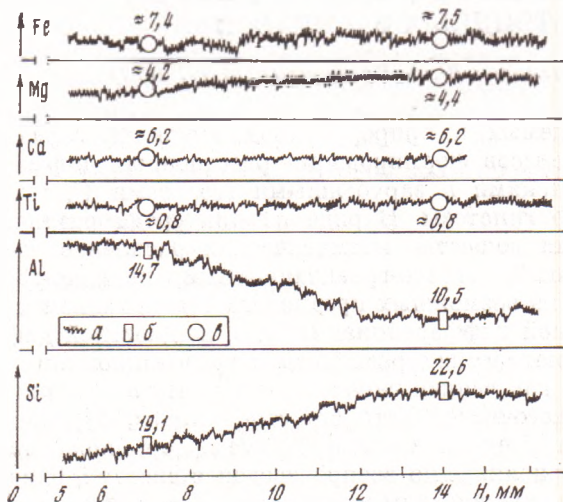


Рис. 1. Распределение петрогенных элементов (вес.%) по высоте в расплаве базальта (опыт № 5-70).  $t_{\text{центриф}} 1420^\circ$ , гравитационное поле  $\sim 1000$ ;  $\tau_{\text{центриф}} 30$  мин. а — запись самописца электронного микронзонда; б — содержания, определенные микронзондированием; в — приближительные содержания, рассчитанные на основании исходного состава пород. Н — от дна ампулы

высоте Si и Al, в то время как другие петрогенные химические элементы не реагировали на него или реагировали очень слабо и неустойчиво, в противоречии с теоретически ожидаемым эффектом<sup>(8)</sup>. Такое поведение элементов, вероятно, следует связывать с особенностями строения силикатных расплавов, которые, как известно, представляют собой частично полимеризованную, структурно-упорядоченную, микрогетерогенную ионно-

Таблица 2

Распределение породообразующих элементов в расплавах после их центрифугирования (вес.%)\*

№ опыта	Составы расплавов	$t_{\text{центриф}}, ^\circ\text{C}$	Положение точки анализа, Н, мм от дна ампулы	Данные электронного микронзондирования					Данные пересчетов, с учетом окиси алюминия, возможно введенной в расплав (*) **					
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	
5-70	Базальтовый	1420	Верх,	28	50,3	20,3	9,8	—	—	60,2	11,3	14,1	—	—
			Промежуточное	23	48,9	19,6	11,2	—	—	58,5	11,0	16,1	—	—
			Низ,	7	45,4	25,2	9,9	—	—	54,3	14,2	14,3	—	—
9-70	Андезитобазальтовый	1450	Верх,	28	57,9	19,8	7,2	—	3,4	62,0	15,1	7,2	—	4,4
			Серед.,	15	58,2	19,9	7,3	—	3,4	62,4	15,2	7,3	—	4,4
			Низ,	3	45,6	34,5	6,9	—	3,5	48,8	26,3	6,9	—	4,6
8-70	Мезобазальтовый	1450	Верх,	14	48,5	19,8	—	—	—	60,2	11,1	—	—	—
			Низ,	7	40,9	27,9	—	—	—	50,7	15,6	—	—	—
										(55,79)	(13,40)	(9,91)	(7,22)	(8,75)
Va-69	Толейтовый	1400	Верх,	13	49,5	23,2	—	12,7	12,7	53,5	16,7	—	15,5	12,2
			Низ,	3	46,1	31,1	—	10,0	12,3	49,6	22,3	—	12,2	12,0
										(51,80)	(19,40)	(—)	14,5	(12,10)

\* Все железо пересчитано на закисное.

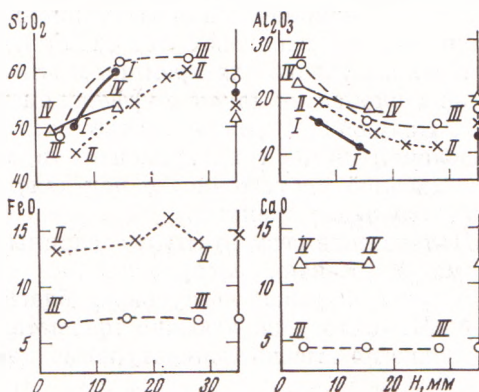
Прочерки означают отсутствие определений.

\*\* Для каждого опыта в конце, в скобках, приведены исходные значения — по данным табл. 1.

молекулярную жидкость (<sup>4</sup>, <sup>13</sup>, <sup>16</sup>). Петрогенные элементы силикатных расплавов в зависимости от их энергии связи с кислородом играют в расплаве различную роль и условно подразделяются на три группы: элементы-стеклообразователи — это P, Si и Al<sup>IV</sup>, энергия связи которых с кислородом  $E_{Me-O}=80$  ккал/моль; промежуточные элементы — Ti и Al<sup>VI</sup> ( $E_{Me-O}=60-80$  ккал/моль); элементы-модификаторы — Fe, Mg, Ca, Na и K ( $E_{Me-O}<60$  ккал/моль (<sup>16</sup>)).

Обращает на себя внимание то, что и по поведению в сильном гравитационном поле эксперимента петрогенные элементы резко разграничивались на те же группы. Элементы-стеклообразователи испытали перерас-

Рис. 2. Диаграмма изменения содержания (вес.%) SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO и CaO по высоте колонок расплавов: I — мезобазальт (опыт № 8-70); II — базальт (№ 5-70); III — андезитобазальт (№ 9-70); IV — искусственное толеитовое стекло (№ Va-69). Справа теми же знаками показаны исходные содержания окислов в исследованных породах. H — от дна ампулы



пределение по высоте расплава, и, таким образом, силы искусственного гравитационного поля оказались сильнее их электрохимических связей. Промежуточные элементы и элементы-модификаторы не претерпели перераспределения (за исключением амфотерного алюминия), поскольку, очевидно, гравитационные силы в опытах были слабее их химических связей. Следовательно, элементы-модификаторы склонны к гомогенному распределению в расплаве.

Обогащение верхней части расплава кремнеземом, вероятно, можно объяснить с позиции ионно-атомных радиусов и ионных плотностей петрогенных химических элементов (<sup>12</sup>, <sup>17</sup>). Если рассчитать ионную плотность петрогенных элементов  $d_i = A / (4/3 \cdot \pi r_i^3)$  г/см<sup>3</sup>, где  $A$  — атомный вес, а  $r_i$  — ионный радиус (по Н. В. Белову и Г. Б. Бокию), то получим следующий нисходящий ряд: S<sup>6+</sup> (315,5) — P<sup>5+</sup> (172,8) — Si<sup>4+</sup> (114,4) — Ti<sup>4+</sup> (43,7) — Al<sup>3+</sup> (34,8) — Fe<sup>2+</sup> (26,0) — Mn<sup>2+</sup> (17,5) и Mg<sup>2+</sup> (14,4) — Ca<sup>2+</sup> (8,54) — Na<sup>+</sup> (5,85) — K<sup>+</sup> (3,98) — O<sup>2+</sup> (1,52) — S<sup>2-</sup> (1,28) — P<sup>3-</sup> (1,16) (<sup>12</sup>).

Экспериментально установлено (<sup>15</sup>), что кремний образует в расплаве различные комплексные анионы типа SiO<sub>4</sub><sup>4-</sup>, Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>6-</sup>, Si<sub>3</sub>O<sub>9</sub><sup>6-</sup> и др., строительной основой которых служит кремнекислородный тетраэдр SiO<sub>4</sub><sup>4-</sup>. Эти комплексные анионы образуют каркасы различных субтаксических группировок, размеры которых на один-два порядка больше, чем у катионов. Ионная плотность таких крупных и «рыхлых» комплексных кремнекислородных анионов намного ниже, чем у элементов-модификаторов, таких как Fe, Mg, Ca, Na и K. Катионы Al<sup>3+</sup> в зависимости от координационного числа играют в расплаве двойную роль (<sup>4</sup>, <sup>10</sup>). Это и катионы-комплексообразователи AlO<sub>4</sub><sup>5-</sup> (<sup>4</sup>) или AlO<sub>6</sub><sup>9-</sup> (<sup>10</sup>), изоморфно замещающие SiO<sub>4</sub><sup>4-</sup> и входящие в сложные алюмокремнекислородные анионы типа Si<sub>x</sub>AlO<sub>y</sub><sup>z-</sup>, и катионы-модификаторы Al<sup>VI</sup>. Возможно также, что в расплаве алюмокислородные анионы AlO<sub>4</sub><sup>5-</sup> и AlO<sub>6</sub><sup>9-</sup> находятся в качестве элементарных компонентов и играют в их строении существенную роль. По-видимому, алюмокремнекислородные и алюмокислородные анионы имеют большую ионную плотность, чем кремнекислородные анионы, вследствие чего они и погружались в расплаве.

Кроме петрогенных элементов, было изучено поведение в гравитационном поле и ряда рудных элементов, в частности золота, урана и тория. Установлено, что в сильном гравитационном поле уран ( $\gamma=19,05$  г/см<sup>3</sup>) и торий ( $\gamma=11,5$  г/см<sup>3</sup>) имеют четко выраженную тенденцию к накоплению в верхней части расплава, а золото ( $\gamma=19,3$  г/см<sup>3</sup>), напротив, концентрировалось в нижней, придонной части. Это согласуется с распределением их в природных геологических объектах (<sup>11</sup>, <sup>12</sup>) и позволяет допустить, что уран и торий в расплаве вводят в легкие комплексные кремнекислородные анионы, а золото, будучи сильно электроотрицательным, находится в расплаве в виде нейтральных атомов.

Все сказанное можно сформулировать в виде следующих выводов:

1. Молекулярно-ионно-гравитационная дифференциация в «сухих» базальтоидных расплавах под действием сильного гравитационного поля установлена только для кремния и алюминия. Для остальных породобразующих элементов такая дифференциация остается проблематичной.

2. Полученные данные согласуются с теоретической оценкой (<sup>8</sup>) о распределении химических элементов в магматических расплавах большой вертикальной протяженности под действием гравитационного поля Земли лишь только для кремния.

Полученные результаты и сделанные на основании их выводы следует рассматривать как предварительные.

Авторы выражают глубокую благодарность проф. А. А. Вертману и В. А. Измайлову за любезно предоставленную возможность работать на установке по высокотемпературному центрифугированию.

Институт геологии и геофизики  
Сибирского отделения  
Академии наук СССР  
Новосибирск

Поступило  
15 VI 1973

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> А. Ф. Белоусов, Б. Ф. Налегов, З. Г. Полякова, Вулканические комплексы рифея и нижнего палеозоя, Новосибирск, 1973. <sup>2</sup> И. М. Волохов, В. М. Иванов, Лысогорский габбропироксенит-дунитовый интрузивный комплекс Западного Саяна, Новосибирск, 1963. <sup>3</sup> Д. П. Григорьев, В сборн., посвященном академику Д. С. Белянкину, Изд. АН СССР, 1946. <sup>4</sup> О. А. Есин, П. В. Гельд, Физическая химия пирометаллургических процессов, М., 1966. <sup>5</sup> А. Н. Заварицкий, В. С. Соболев, Физико-химические основы петрографии изверженных горных пород, 1961. <sup>6</sup> В. М. Иванов, В сборн. Магматические формации Сибири и Дальнего Востока, Тр. Инст. геол. и геофиз. СО АН СССР, в. 79 (1969). <sup>7</sup> П. В. Иншин, О механизмах дифференциации магмы, Алма-Ата, 1972. <sup>8</sup> А. А. Кадик, Химия земной коры, т. 1, Изд. АН СССР, 1963. <sup>9</sup> И. Ю. Малиновский и др. Сборн. Экспериментальные исследования по минералогии (1968–1969 гг.), Новосибирск, 1969. <sup>10</sup> Г. А. Рашин, Изв. АН СССР, сер. геол., № 12 (1959). <sup>11</sup> Ф. К. Шипулин, Докл. на I Международн. геохим. конгрессе, М., 1972. <sup>12</sup> Ю. Г. Щербаков, Распределение и условия концентрации золота в рудных провинциях, «Наука», 1967. <sup>13</sup> В. В. Щербина, В кн. Вопросы петрографии и минералогии, в. 1, Изд. АН СССР, 1953. <sup>14</sup> W. Hamilton, H. G. Wilshire, Geol. Soc. Am. Spec. Paper., № 82 (1965). <sup>15</sup> C. W. Lentz, J. Inorg. and Nucl. Chem., v. 3, № 4 (1964). <sup>16</sup> K. H. Sun, M. L. Huggins, J. Phys. and Coll. Chem., v. 51, № 2 (1947). <sup>17</sup> E. Szadeczky-Kardoss, Acta Geol. Acad. Sci. (Hungary), № 1–2 (1953).