

УДК 551.2+551.14+552.1

DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-7-53-61

ВЛИЯНИЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИОННОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ НА СОСТАВ ОСТАТОЧНОГО РАСПЛАВА ДЛЯ ПЛАГИОКЛАЗА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ P-T УСЛОВИЯХ

INFLUENCE OF CRYSTALLIZATION DIFFERENTIATION ON THE COMPOSITION OF THE RESIDUAL MELT FOR PLAGIOCLASE UNDER DIFFERENT P-T CONDITIONS

А. А. Кирдяшкин,

Институт геологии и минералогии
им. В. С. Соболева СО РАН,
г. Новосибирск
aak@igm.nsc.ru

A. Kirdyashkin,

Sobolev Institute of Geology and
Mineralogy SB RAS, Novosibirsk



А. Г. Кирдяшкин,

Институт геологии и минералогии
им. В. С. Соболева СО РАН,
г. Новосибирск
agk@igm.nsc.ru

A. Kirdyashkin,

Sobolev Institute of Geology and
Mineralogy SB RAS, Novosibirsk



Исследованы процессы кристаллизационной дифференциации в объеме расплава на примере плагиоклаза, представленного непрерывным рядом твердых растворов альбит – анортит. Для двухкомпонентной системы альбит – анортит рассчитано изменение состава расплава вследствие кристаллизационной дифференциации при значениях давления $P = 6,3$ кбар и 1 бар и температуры $T = 1410$ °С, 1350 и 1300 °С. Представлен метод расчета состава расплава, остающегося после осаждения частиц плагиоклаза. Приведены результаты расчета состава остаточного расплава для составов исходного расплава, отвечающих различным номерам плагиоклаза, и для различных значений давления и температуры. Изменение состава вследствие кристаллизационной дифференциации расплава представляет собой разность процентного состава для каждого оксида на линии ликвидуса и начального состава расплава.

Получены безразмерные соотношения (критерии подобия) для состава исходного расплава $\overline{An/Ab}$ и изменения содержания для оксидов $\overline{\Delta SiO_2}$, $\overline{\Delta Al_2O_3}$, $\overline{\Delta Na_2O}$, $\overline{\Delta CaO}$. Для каждого оксида для расплава при различных значениях P и T представлены массивы чисел в виде процентного содержания и в безразмерном виде (в виде величин названных критериев подобия). Изменение состава исходного расплава происходит из-за его обеднения компонентами вследствие осаждения твердых частиц и уменьшения объема расплава на величину объема осажденных твердых взвесей и расплава в межкристаллических пространствах осажденного слоя. Показано, что процессы кристаллизационной дифференциации есть комплекс гидродинамических (геодинамических) и петрологических процессов, изучение закономерностей которых может быть проведено с использованием методов теории подобия. Изменение состава расплава вследствие кристаллизационной дифференциации может быть представлено на основе теории подобия в виде аналитической зависимости между критериями петрологического подобия

Ключевые слова: гидродинамическая неустойчивость; расплав; плагиоклаз; осаждение твердых частиц; теория подобия; критерий подобия

Crystallization differentiation processes in the melt volume for albite-anorthite solid solution series have been studied. For the albite-anorthite system, the change in the melt composition due to crystallization differentiation is calculated for pressure values $P = 6,3$ kbar and 1 bar and temperature $T = 1410$ °С, 1350 and 1300 °С. A calculation technique is presented for composition of the melt remaining after settling of plagioclase particles. The residual melt compositions have been calculated for different initial melt compositions and different P - T parameters. The change in composition due to crystallization differentiation of the melt is the difference in the percentage composition for each oxide on the liquidus line and the initial melt composition.

The dimensionless ratios (similarity criteria) for the initial melt composition $\overline{An/Ab}$ and the change of the oxide content $\overline{\Delta SiO_2}$, $\overline{\Delta Al_2O_3}$, $\overline{\Delta Na_2O}$, $\overline{\Delta CaO}$ have been obtained. The change of each oxide percentage is calculated in weight percents and in the dimensionless form (as values of above-mentioned similarity criteria). The initial melt is depleted in different components. The depletion is due to settling of plagioclase particles and melt volume reduction. The latter is the sum of the solid particles and the melt volumes in the intercrystalline spaces

of the settled particles' layer. It is shown that the processes of crystallization differentiation are the sum total of hydrodynamic (geodynamic) and petrological processes. These processes can be studied using the methods of similarity theory. The compositional change in the melt due to crystallization differentiation can be represented in the form of an analytical relationship between the petrological similarity criteria

Key words: hydrodynamic instability; melt; plagioclase; settling of solid particles; similarity theory; similarity criterion

Введение. Теория кристаллизационной дифференциации впервые подробно представлена в трудах Н. Л. Боуэна [11–13]. Осаждение кристаллов из магматического расплава играет ключевую роль при кристаллизации магм различного состава [9; 22]. Представлены закономерности изменения плотности остаточного расплава в случае отделения из него различных компонентов из расплава [23]. Исследуется гравитационная неустойчивость фронта затвердевания (для силловых интрузий) [19].

Усилия исследователей направлены на изучение деталей процесса кристаллизации плагиоклаза, в частности зависимости скорости кристаллизации плагиоклаза от скорости охлаждения, влияния 3D-сети цепочек кристаллов на кристаллизационную дифференциацию базальтового расплава, зональности плагиоклаза и возможности установления с ее использованием хода дифференциации расплава [14; 15; 20; 21].

Ранее представлен анализ процессов тепло- и массопереноса в расплаве грибовидной головы мантийного термохимического плюма [1–4]. Рассмотрено влияние кристаллизационной дифференциации на состав расплава в случае, когда начальный состав расплава отвечает составу корового слоя [3; 4] и в предположении, что исходный состав расплава – базальтовый [1; 2].

Для случая двухкомпонентной системы альбит – анортит рассчитывается изменение состава расплава вследствие кристаллизационной дифференциации при различных значениях давления и температуры.

Задачи исследования:

1) определить изменение состава расплава для составов исходного расплава, соответствующих различным номерам плагиоклаза, и для разных значений P и T ;

2) на основе методов теории подобия вычислить значения критериев подобия для изменения состава расплава и изменения содержания для каждого оксида и найти аналитическую зависимость между критериями петрологического подобия.

Гидродинамическая устойчивость расплава для случая двухкомпонентной системы альбит – анортит. Плагиоклазы представляют собой полевые шпаты, образующие непрерывный ряд твердых растворов. Состав плагиоклазов может меняться от чисто натриевого члена – альбита, химическая формула которого в виде оксидов $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{SiO}_2$, до чисто кальциевого члена – анортита ($\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$) [8]. Фазовая диаграмма двухкомпонентной системы альбит – анортит для $P = 1$ бар [10] и 6,3 кбар представлена на рис. 1. Область гетерогенного равновесия жидких и твердых растворов расположена между кривыми ликвидуса и солидуса ($a - b$). Для состава плагиоклаза в точке A количество выделившихся кристаллов пропорционально длине линии Aa , а количество оставшейся жидкости пропорционально длине линии Ab . В отсутствие гравитационного поля равновесие между жидкостью и твердыми частицами может существовать сколь угодно долго.

В условиях гравитационного ускорения твердые частицы, имеющие большую плотность, чем расплав, будут осаждаться в изотермическом объеме расплава. Поскольку состав осажденных частиц (рис. 1, точка f) более богат анортитом, чем состав расплава (рис. 1, точка φ), по мере осаждения частиц состав расплава будет смещаться к линии ликвидуса. Происходит изменение состава расплава за счет осаждения частиц плагиоклаза. Происходит обеднение расплава анортитом, и состав расплава будет смещаться к линии ликвидуса. В конечном итоге состав расплава будет соответствовать точке φ – составу плагиоклаза на линии ликвидуса. Таким образом, в изотермическом объеме расплава (например, для плагиоклаза) вследствие гидродинамической неустойчивости в системе расплав – твердые частицы возникает кристаллизационная дифференциация. В результате осаждения частиц происходит обеднение расплава анортитовым компонентом и смещение состава расплава в пределе на линию ликвидуса [3].

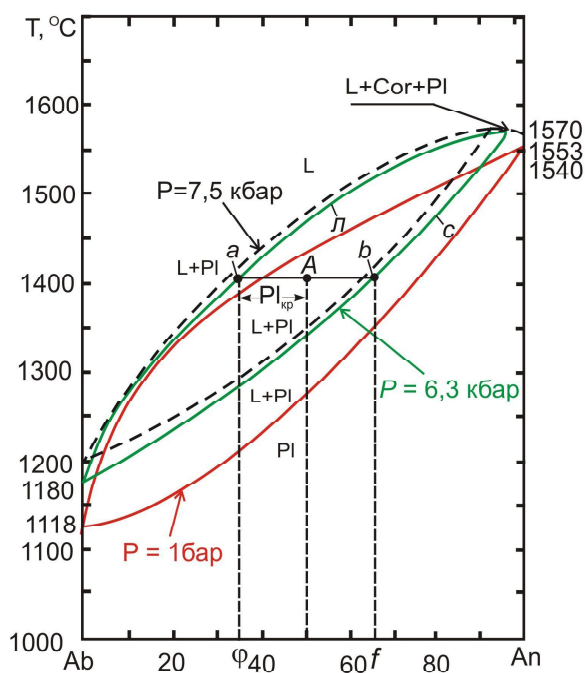


Рис. 1. Фазовая диаграмма плагиоклазов для различных давлений: с – солидус при $P = 6,3$ кбар; л – ликвидус при $P = 6,3$ кбар; диаграмма плавкости: при $P = 1$ бар по [10], при $P = 7,5$ кбар по [3; 18]. PI – плагиоклаз, Cor – корунд, L – расплав / Fig. 1. Phase diagram of plagioclase feldspars for different pressures: с – solidus at $P = 6,3$ kbar; л – liquidus at $P = 6,3$ kbar; melting of plagioclase at: $P = 1$ bar after [10], at $P = 7,5$ kbar after [3; 18]. PI – plagioclase, Cor – corundum, L – melt.

Оценены масштабы времени $t = L/U_{\text{щ}}$, где L – толщина слоя расплава, $U_{\text{щ}}$ – скорость осаждения частиц плагиоклаза [3; 4]. Например, в слое расплава толщиной $L = 10$ см время осаждения частиц радиусом $r = 0,2$ мм при величине коэффициента динамической вязкости $\eta = 10^2$ Па · с составляет $t = 1,9 \cdot 10^7$ с = 0,6 лет ($U_{\text{щ}} = 5,2 \cdot 10^{-9}$ м/с). Для процессов, протекающих в земных условиях, например, для толщины слоя расплава $L = 10$ км (толщины расплава грибообразной головы термохимического плюма [3; 17]) при $r = 0,2$ мм и $\eta = 10^2 \dots 10^3$ Па · с, время осаждения $t = 6 \cdot 10^3 \dots 60 \cdot 10^3$ лет. Для $r = 0,1$ мм и определенных η , $U_{\text{щ}} = 1,3 \cdot 10^{-9} \dots 1,3 \cdot 10^{-8}$ м/с и $t = 24,4 \cdot 10^3 \dots 244 \cdot 10^3$ лет.

Длительное существование больших объемов расплава возможно при долгоживущем источнике тепла. Таким источником

является термохимический плюм с грибообразной головой. Плюмы могут быть ответственными за формирование крупных интрузивных тел, в том числе батолитов [16; 17]. Тепловая мощность на подошве такого плюма, расположенной на границе ядро – мантия, $N = 2,7 \cdot 10^{10} \dots 1,4 \cdot 10^{11}$ Вт [16]. Время деятельности плюмов с грибообразной головой по геологическим данным 20...30 млн лет [3], оно много больше времени осаждения частиц t .

Расчеты состава расплава. В качестве примера расчета состава расплава в табл. 1 представлен состав на линии ликвидуса фазовой диаграммы плагиоклазов для $P = 1$ бар и $T = 1350$ °С. Учитываем, что состав плагиоклаза принято обозначать номером плагиоклаза, численное значение которого соответствует процентному весовому содержанию анортита [8]. Согласно диаграмме плавкости системы альбит – анортит (рис. 1), при указанных P - T параметрах состав расплава, отвечающего плагиоклазу N 24, находится на линии ликвидуса (PI_л N 24), весовое процентное содержание анортита $An_n = 24$ %, альбита $Ab_n = 76$ %, отношение содержания анортита и альбита $(An/Ab)_n = 0,31$.

Химические формулы альбита и анортита могут быть представлены в виде оксидов: для альбита – $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ и для анортита – $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$. В табл. 1 $M_{\text{ок}}$ – молекулярный вес соответствующего оксида, M_{Ab} и M_{An} – молекулярный вес альбита и анортита соответственно. Процентное содержание каждого оксида в Ab_n равно $(M_{\text{ок}}/M_{Ab}) \times 76$ %, в An_n равно $(M_{\text{ок}}/M_{An}) \times 24$ %. Суммарное содержание каждого оксида представлено в 10-м столбце. Химический состав на линии ликвидуса следующий: $SiO_2 = 62,76$ %; $Al_2O_3 = 23,32$ %; $Na_2O = 9,12$ %; $CaO = 4,80$ %. Таким способом вычислялись составы расплава, представленные в табл. 2–4.

В табл. 2–4 приведены составы расплава при различных давлениях и температурах расплава на линиях солидуса $M_{\text{ок}}$ и ликвидуса $M_{\text{ок}}/M_{Ab}$, а также для различных составов исходного расплава $(M_{\text{ок}}/M_{Ab}) \times 76$ %, An_n , $M_{\text{ок}}$.

Безразмерные величины для состава (табл. 2–4) обсуждаются в следующем разделе. Состав плагиоклаза на линии солидуса и ликвидуса определялся по фазовой диаграмме плагиоклазов (рис. 1) для соответствующих значений P и T .

Таблица 1 / Table 1

Состав расплава, отвечающего Pl_n N 24 (состав на линии ликвидуса) для $P = 1$ бар и $T = 1350$ °C /
 The melt composition corresponding to plagioclase Pl_n N 24 (composition on the liquidus line)

Ab_n	M_{ox}	$\frac{M_{ox}}{M_{Ab}}$	$(\frac{M_{ox}}{M_{Ab}}) \times 76$	An_n	M_{ox}	$\frac{M_{ox}}{M_{An}}$	$(\frac{M_{ox}}{M_{An}}) \times 24$	Оксид/ Oxide	Содержание, %/ Content, %
6SiO ₂	360,51	0,69	52,44	2SiO ₂	120,17	0,43	10,32	SiO ₂	62,76
Al ₂ O ₃	101,96	0,19	14,44	Al ₂ O ₃	101,96	0,37	8,88	Al ₂ O ₃	23,32
Na ₂ O	61,98	0,12	9,12	CaO	56,08	0,20	4,80	Na ₂ O	9,12
								CaO	4,80

Таблица 2 / Table 2

Состав расплава для $P = 6,3$ кбар, $T = 1410$ °C / The melt composition for $P = 6,3$ kbar and $T = 1410$ °C

Для Pl N / For Pl N					
Оксиды, %; Безразмерные величины / Oxides, %; Dimensionless values	Солидус (N 66) / Solidus (N 66)	Ликвидус (N 34) / Liquidus (N 34)	N 56	N 47.5	N 40
SiO ₂	51,84	60,16	54,40	56,63	58,60
Al ₂ O ₃	30,88	25,12	29,08	27,55	26,20
Na ₂ O	4,08	7,82	5,28	6,30	7,20
CaO	13,20	6,80	11,20	9,50	8,00
An/Ab	1,94	0,52	1,27	0,90	0,67
$\overline{An/Ab}$	1,00	0,00	0,53	0,27	0,11
$\overline{\Delta SiO_2}$	1,00	0,00	0,69	0,42	0,19
$\overline{\Delta Al_2O_3}$	1,00	0,00	0,69	0,42	0,19
$\overline{\Delta Na_2O}$	1,00	0,00	0,68	0,41	0,17
$\overline{\Delta CaO}$	1,00	0,00	0,69	0,42	0,19

Таблица 3 / Table 3

Состав расплава для $P = 6,3$ кбар, $T = 1300$ °C / The melt composition for $P = 6,3$ kbar and $T = 1300$ °C

Для Pl N / For Pl N					
Оксиды, %; Безразмерные величины / Oxides, %; Dimensionless values	Солидус (N 41) / Solidus (N 41)	Ликвидус (N 14) / Liquidus (N 14)	N 33	N 26	N 19
SiO ₂	58,07	65,36	60,42	62,24	64,06
Al ₂ O ₃	26,36	21,52	24,90	23,68	22,42
Na ₂ O	7,08	10,32	8,04	8,88	9,72
CaO	8,30	2,80	6,60	5,20	3,80
An/Ab	0,70	0,16	0,49	0,35	0,24
$\overline{An/Ab}$	1,00	0,00	0,61	0,35	0,13
$\overline{\Delta SiO_2}$	1,00	0,00	0,68	0,43	0,18
$\overline{\Delta Al_2O_3}$	1,00	0,00	0,70	0,44	0,19
$\overline{\Delta Na_2O}$	1,00	0,00	0,70	0,44	0,18
$\overline{\Delta CaO}$	1,00	0,00	0,69	0,44	0,18

Таблица 4 / Table 4

Состав расплава для $P = 1$ бар (1 атм), $T = 1350$ °C / The melt composition for
 $P = 1$ bar (1 atm) and $T = 1350$ °C

Для PI N / For PI N					
оксиды, %; безразмерные величины/ oxides, %; dimensionless values	солидус (N 64) / solidus (N 64)	ликвидус (N24) / liquidus (N 24)	N 50	N 41	N 30
SiO ₂	52,36	62,07	56,00	58,34	61,20
Al ₂ O ₃	30,52	23,12	28,00	26,39	24,40
Na ₂ O	4,32	9,00	6,00	7,08	8,40
CaO	12,80	4,80	10,00	8,20	6,00
An/Ab	1,78	0,31	1,000	0,70	0,43
$\overline{An/Ab}$	1,00	0,00	0,47	0,26	0,08
$\overline{\Delta SiO_2}$	1,00	0,00	0,65	0,43	0,15
$\overline{\Delta Al_2O_3}$	1,00	0,00	0,65	0,43	0,15
$\overline{\Delta Na_2O}$	1,00	0,00	0,65	0,43	0,15
$\overline{\Delta CaO}$	1,00	0,00	0,65	0,43	0,15

По представленному в табл. 2–4 процентному весовому содержанию каждого из оксидов для исходного расплава и для расплава на линии ликвидуса возможно для каждого оксида определить изменение процентного содержания вследствие кристаллизационной дифференциации. В результате расчетов получается большой массив чисел. Задача состоит в выяснении закономерностей проявления процессов кристаллизационной дифференциации.

Исследование эволюции состава расплава с использованием теории подобия. Плагиоклаз представляет собой сложный комплекс, являющийся изоморфной смесью двух компонентов и состоящий из четырех оксидов и пяти химических элементов. Количественно описать такую многопараметрическую систему весьма сложно. В механике сплошной среды, например, вязкой жидкости, также многопараметрической системы, для представления, обобщения и выяснения закономерностей процессов используется теория подобия, анализ размерностей [5; 6]. Например, тепловые гравитационные течения, т. е. свободноконвективные течения, определяющие в физике Земли геодинамические процессы, процессы тепло- и массообмена, а следовательно, и петрологические, описываются для относительно простых случаев десятью параметрами.

Методы теории подобия позволяют представить решение задачи о тепло- и массопереносе при свободной конвекции в

нескольких безразмерных критериях подобия. Например, критерий Рэлея имеет вид $Ra = \beta g \Delta T^3 / \nu \alpha$, где β – коэффициент теплового объемного расширения, g – ускорение силы тяжести, ΔT – перепад температуры, l – линейный размер, α – коэффициент температуропроводности, ν – коэффициент кинематической вязкости. Он представляет взаимосвязь шести параметров, позволяет вместе с другими критериями подобия обработать имеющиеся результаты лабораторных и численных экспериментов и понять закономерности протекающих процессов.

При изучении процессов кристаллизационной дифференциации мы используем фазовую диаграмму системы альбит – анортит. Из фазовой диаграммы следует, что отношение процентных весовых содержаний анортита к альбиту однозначно определяет состав плагиоклаза. Это отношение представляет собой безразмерную величину, т. е. критерий, имеющий вид An/Ab. Фазовую диаграмму двухкомпонентной системы Ab – An можно представить в виде зависимости $T(An/Ab)$. Она может быть представлена для различных значений давления в виде двух кривых – для ветвей солидуса и ликвидуса – $T(An/Ab)_c$ и $T(An/Ab)_n$. Процентное содержание An и Ab для численного значения отношения An/Ab определяется из соотношений $An = 100 \%(An/Ab) / [1 + (An/Ab)]$, $Ab = 100 \% - An$.

Будем анализировать результаты кристаллизационной дифференциации, используя безразмерный критерий An/Ab, который

представляет состав плагиоклаза. Нашей задачей является выяснение влияния исходного состава расплава на величину изменения процентного содержания каждого оксида в результате процесса кристаллизационной дифференциации. Результаты вычислений обнаруживают, что состав остаточного расплава такой же, как и состав на линии ликвидуса. В дальнейшем будем определять изменение процентного состава для различных оксидов, зная состав на линии ликвидуса и исходный состав расплава. Разность процентного состава для каждого оксида на линии ликвидуса и начального состава расплава и есть изменение состава вследствие кристаллизационной дифференциации расплава.

Таким образом, нам нужно выяснить закономерность изменения $\Delta SiO_2 = (SiO_2)_{ир} - (SiO_2)_л$; $\Delta Al_2O_3 = (Al_2O_3)_{ир} - (Al_2O_3)_л$; $\Delta Na_2O = (Na_2O)_{ир} - (Na_2O)_л$; $\Delta CaO = (CaO)_{ир} - (CaO)_л$ (индекс "ир" относится к исходному расплаву) в результате кристаллизационной дифференциации для исходного состава расплава, отвечающего плагиоклазу, и для различных значений давления и температуры расплава. Согласно теории подобия, прежде всего, необходимо уяснить характерные масштабы изменений $\Delta(An/Ab)$ и $\Delta SiO_2, \Delta Al_2O_3, \Delta Na_2O, \Delta CaO$.

Согласно фазовой диаграмме системы альбит-анортит, характерным масштабом изменения состава расплава $\Delta(An/Ab)$ является разность $(An/Ab)_c - (An/Ab)_л$. Масштабами изменения процентного содержания оксидов $\Delta SiO_2, \Delta Al_2O_3, \Delta Na_2O, \Delta CaO$ являются, соответственно, разности $(SiO_2)_c - (SiO_2)_л$; $(Al_2O_3)_c - (Al_2O_3)_л$; $(Na_2O)_c - (Na_2O)_л$; $(CaO)_c - (CaO)_л$. В этом случае безразмерная величина или критерий петрологического подобия для состава расплава будет иметь вид

$$\left(\frac{An}{Ab}\right) = \frac{(An/Ab)_{ир} - (An/Ab)_л}{(An/Ab)_c - (An/Ab)_л}, \quad (1)$$

где индекс "ир" относится к составу исходного расплава;

индексы "л" и "с" – к составу на линии ликвидуса и солидуса, соответственно.

Физический и петрологический смысл этого безразмерного комплекса-критерия в том, что он характеризует и состав плагиоклаза, и его положение на фазовой диаграмме для параметров P и T .

Безразмерная величина или критерий петрологического подобия содержания для каждого оксида

$$\frac{\Delta SiO_2}{(SiO_2)_c - (SiO_2)_л}, \quad \frac{\Delta Al_2O_3}{(Al_2O_3)_c - (Al_2O_3)_л}, \quad (2)$$

$$\frac{\Delta Na_2O}{(Na_2O)_c - (Na_2O)_л}, \quad \frac{\Delta CaO}{(CaO)_c - (CaO)_л}.$$

Физический и петрологический смысл этого критерия состоит в том, что он характеризует относительную величину содержания каждого оксида.

Значения безразмерных величин (критериев подобия) An/Ab ; $\Delta SiO_2, \Delta Al_2O_3, \Delta Na_2O, \Delta CaO$ (табл. 2–4), вычисленные с использованием соотношений (1) и (2), представлены в табл. 2–4 и графически представлены на рис. 2.

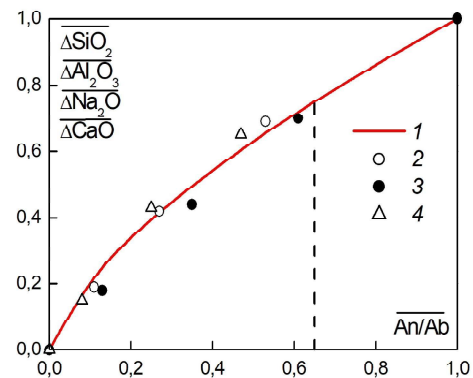


Рис. 2. Изменение безразмерной величины содержания оксидов $\Delta SiO_2, \Delta Al_2O_3, \Delta Na_2O, \Delta CaO$ вследствие кристаллизационной дифференциации в изотермических условиях в зависимости от безразмерной величины An/Ab , характеризующей состав исходного расплава.

Каждая точка относится к изменению содержания всех четырех оксидов: 1 – степенная зависимость $\Delta SiO_2 = An/Ab^{2/3}, \Delta Al_2O_3 = An/Ab^{2/3}, \Delta Na_2O = An/Ab^{2/3}, \Delta CaO = An/Ab^{2/3}$; 2 – PI при $P = 6,3$ кбар, $T = 1410$ °C; 3 – PI при $P = 6,3$ кбар, $T = 1300$ °C; 4 – PI при $P = 1$ бар, $T = 1350$ °C.

Пунктирная прямая линия отвечает значению $An/Ab = 0,65$ / Fig. 2. The change of dimensionless oxide content $\Delta SiO_2, \Delta Al_2O_3, \Delta Na_2O, \Delta CaO$ versus the dimensionless value An/Ab for the initial melt. The variation of oxide content results from crystallization differentiation under the isothermal conditions. Each point refers to a change in the content of all four oxides. 1 – power-law dependence; $\Delta SiO_2 = An/Ab, \Delta Al_2O_3 = An/Ab, \Delta Na_2O = An/Ab, \Delta CaO = An/Ab$; 2 – PI at $P = 6,3$ kbar and $T = 1410$ °C; 3 – PI at $P = 6,3$ kbar and $T = 1300$ °C; 4 – PI at $P = 1$ bar and $T = 1350$ °C. The dashed straight line corresponds to the value $An/Ab = 0,65$

Из табл. 2–4 видно, что для каждого состава плагиоклаза, выражаемого критерием An/Ab , безразмерные величины для четырех оксидов имеют одно и то же значение. Поэтому каждая точка на рис. 2 указывает на величину изменения содержания четырех оксидов (ΔSiO_2 , ΔAl_2O_3 , ΔNa_2O , ΔCaO) вследствие кристаллизационной дифференциации для состава исходного расплава, характеризующегося критерием An/Ab . Изменение безразмерной величины содержания оксидов может быть аппроксимировано степенной зависимостью $\Delta SiO_2 = An/Ab^{2/3}$, $\Delta Al_2O_3 = An/Ab^{2/3}$, $\Delta Na_2O = An/Ab^{2/3}$, $\Delta CaO = An/Ab^{2/3}$; (см. рис. 2). Аппроксимирующая кривая 1, выражающая эту степенную зависимость, представлена на рис. 2.

Вместе с осажденным плагиоклазом остается приблизительно 26 % расплава в межкристаллических пространствах [7]. Процессы кристаллизационной дифференциации не могут возникнуть при доле расплава, меньшей чем 0,26 от общего его количества. При доле расплава меньшей 0,26, твердые частицы плагиоклаза находятся во взаимном контакте и представляют собой каркас, в межкристаллических пространствах которого находится расплав. Этому предельному случаю отвечает состав расплава, для которого безразмерная величина $An/Ab = 0,65$. На рис. 2 эта граница представлена пунктирной линией.

Таким образом, эволюция состава расплава вследствие процессов кристаллизационной дифференциации может быть представлена в виде аналитической зависимости на основе теории подобия. Изменение содержания оксидов в остаточном расплаве при кристаллизационной дифференциации проис-

ходит в связи с обеднением расплава его компонентами, осаждающимися с твердой фазой, и уменьшением объема расплава на величину объема осажденных твердых частиц и расплава в межкристаллических пространствах.

Заключение. Представлен метод определения состава остаточного расплава вследствие кристаллизационной дифференциации и результаты расчетов состава расплава для состава исходного расплава, отвечающего различным номерам плагиоклаза, и различных значений давления и температуры расплава. Анализ полученных результатов, представляющих массив числовых значений процентного состава для каждого оксида при различных значениях P и T , выполнен на основе теории подобия.

Определены безразмерные соотношения (критерии подобия) состава плагиоклаза An/Ab и изменения содержания оксидов ΔSiO_2 , ΔAl_2O_3 , ΔNa_2O , ΔCaO . Изменение безразмерной величины содержания оксидов может быть аппроксимировано степенной зависимостью $\Delta SiO_2 = An/Ab^{2/3}$, $\Delta Al_2O_3 = An/Ab^{2/3}$, $\Delta Na_2O = An/Ab^{2/3}$, $\Delta CaO = An/Ab^{2/3}$.

Изменение химического состава расплава, отвечающего плагиоклазу, при кристаллизационной дифференциации происходит в связи с его обеднением компонентами, осаждающимися вместе с твердой фазой, и уменьшением его объема на величину объема осажденных твердых взвесей и расплава в межкристаллических пространствах.

Эволюция состава расплава вследствие кристаллизационной дифференциации может быть представлена в виде аналитической зависимости между критериями петрологического подобия на основе методов теории подобия.

Список литературы

1. Кирдяшкин А. А., Кирдяшкин А. Г., Сурков Н. В. Влияние тепло- и массообмена на состав базальтового расплава в грибообразной голове термохимического плюма // Вестник Забайкальского государственного университета. 2018. Т. 24, № 10. С. 21–31.
2. Кирдяшкин А. А., Кирдяшкин А. Г., Сурков Н. В. Особенности плавления в канале термохимического плюма и теплообмен при кристаллизационной дифференциации базальтового расплава в грибообразной голове плюма // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10, № 1. С. 1–19.
3. Кирдяшкин А. Г., Кирдяшкин А. А. Гидродинамика и теплообмен в грибообразной голове термохимического плюма // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9, № 1. С. 263–286.
4. Кирдяшкин А. Г., Кирдяшкин А. А., Гладков И. Н., Дистанов В. Е. Тепло- и массообмен и кристаллизационная дифференциация в грибообразной голове термохимического плюма // Вестник Забайкальского государственного университета. 2018. Т. 24, № 2. С. 4–13.
5. Кутателадзе С. С. Анализ подобия в теплофизике. Новосибирск: Наука, 1982. 280 с.
6. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.
7. Некрасов Б. В. Основы общей химии: в 2 т. Т. 1. М.: Химия, 1973. 656 с.

8. Саранчина Г. М., Шинкарев Н. Ф. Петрография магматических и метаморфических пород. Л.: Недра, 1967. 324 с.
9. Ariskin A. A., Yaroshevsky A. A. Crystallization differentiation of intrusive magmatic melt: development of a convection-accumulation model // *Geochemistry International*. 2006. Vol. 44, No. 1. P. 72–93.
10. Bowen N. L. The melting phenomena of the plagioclase feldspars // *American Journal of Science*. 1913. Vol. 35, No. 210. P. 577–599.
11. Bowen N. L. The later stages of the evolution of the igneous rocks // *Journal of Geology*. 1915. Vol. 23, No. 8. P. 1–91.
12. Bowen N. L. Crystallization-differentiation in igneous magmas // *Journal of Geology*. 1919. Vol. 27, No. 6. P. 393–430.
13. Bowen N. L. *The evolution of the igneous rocks*. New York: Dover Publications, 1956. 333 p.
14. Cashman K. V. Relationship between plagioclase crystallization and cooling rate in basaltic melts // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1993. Vol. 113. P. 126–142.
15. Hoshida T., Obata M. Zoning and resorption of plagioclase in a layered gabbro, as a petrographic indicator of magmatic differentiation // *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*. 2009. Vol. 100, No. 1-2. P. 1–15.
16. Kirdyashkin A. A., Kirdyashkin A. G., Distanov V. E., Gladkov I. N. Geodynamic regimes of thermochemical mantle plumes // *Russian Geology and Geophysics*. 2016. Vol. 57, No. 6. P. 858–867.
17. Kirdyashkin A. A., Kirdyashkin A. G., Gurov V. V. Parameters of thermochemical plumes responsible for the formation of batholiths: results of experimental simulation // *Geotectonics*. 2017. Vol. 51, No. 4. P. 398–411.
18. Lindsley D. H. *Melting relations of plagioclase at high pressures // Origin of anorthosite and related rocks*. New York: State Museum and Science Service, 1968. P. 39–46.
19. Marsh B. D. On bimodal differentiation by solidification front instability in basaltic magmas, part 1: Basic mechanics // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2002. Vol. 66, No. 12. P. 2211–2229.
20. Philpotts A. R., Dickson L. D. The formation of plagioclase chains during convective transfer in basaltic magma // *Nature*. 2000. Vol. 406. P. 59–61.
21. Philpotts A. R., Shi J., Brustman C. Role of plagioclase crystal chains in the differentiation of partly crystallized basaltic magma // *Nature*. 1998. Vol. 395. P. 343–346.
22. Shaw H. R. Comments on viscosity, crystal settling, and convection in granitic magmas // *American Journal of Science*. 1965. Vol. 263, No. 2. P. 120–152.
23. Sparks R. S. J., Huppert H. E. Density changes during the fractional crystallization of basaltic magmas: fluid dynamic implications // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1984. Vol. 85. P. 300–309.

References

1. Kirdyashkin A. A., Kirdyashkin A. G., Gladkov I. N., Distanov V. E. *Vestnik Zabaykalskogo gosudarstvennogo universiteta* (Transbaikal State University Journal), 2018, vol. 24, no. 2, pp. 4–13.
2. Kirdyashkin A. A., Kirdyashkin A. G., Surkov N. V. *Vestnik Zabaykalskogo gosudarstvennogo universiteta* (Transbaikal State University Journal), 2018, vol. 24, no. 10, pp. 21–31.
3. Kirdyashkin A. G., Kirdyashkin A. A. *Geodynamika i Tektonofizika* (Geodynamics and Tectonophysics), 2018, vol. 9, no. 1, pp. 263–286.
4. Kirdyashkin A. A., Kirdyashkin A. G., Surkov N. V. *Geodynamika i Tektonofizika* (Geodynamics and Tectonophysics), 2019, vol. 10, no. 1, pp. 1–19.
5. Kutateladze S. S. *Analiz podobiya v teplofizike* (Similarity analysis in thermophysics). Novosibirsk: Nauka, 1982. 280 p.
6. Mikheev M. A., Mikheeva I. M. *Osnovy teploperedachi* (Basics of heat transfer). Moscow: Energiya, 1977. 344 p.
7. Nekrasov B. V. *Osnovy obshchey himii: v 2 t. T. 1* (Fundamentals of general chemistry: in 2 vol. Vol. 1). Moscow: Khimiya, 1973. 656 p.
8. Saranchina G. M., Shinkarev N. F. *Petrografiya magmaticheskikh i metamorficheskikh porod* (Petrography of magmatic and metamorphic rocks). Leningrad: Nedra, 1967. 324 p.
9. Ariskin A. A., Yaroshevsky A. A. *Geochemistry International* (Geochemistry International), 2006, vol. 44, no. 1, pp. 72–93.
10. Bowen N. L. *American Journal of Science* (American Journal of Science), 1913, vol. 35, no. 210, pp. 577–599.
11. Bowen N. L. *Journal of Geology* (Journal of Geology), 1915, vol. 23, no. 8, pp. 1–91.
12. Bowen N. L. *Journal of Geology* (Journal of Geology), 1919, vol. 27, no. 6, pp. 393–430.
13. Bowen N. L. *The evolution of the igneous rocks* (The evolution of the igneous rocks). New York: Dover Publications, 1956. 333 p.

14. Cashman K. V. *Contributions to Mineralogy and Petrology* (Contributions to Mineralogy and Petrology), 1993, vol. 113, pp. 126–142.
15. Hoshide T., Obata M. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh* (Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh), 2009, vol. 100, no. 1–2, pp. 1–15.
16. Kirdyashkin A. A., Kirdyashkin A. G., Distanov V. E., Gladkov I. N. *Russian Geology and Geophysics* (Russian Geology and Geophysics), 2016, vol. 57, no. 6, pp. 858–867.
17. Kirdyashkin A. A., Kirdyashkin A. G., Gurov V. V. *Geotectonics* (Geotectonics), 2017, vol. 51, no. 4, pp. 398–411.
18. Lindsley D. H. *Origin of anorthosite and related rocks* (Origin of anorthosite and related rocks). New York: State Museum and Science Service, 1968, pp. 39–46.
19. Marsh B. D. *Geochimica et Cosmochimica Acta* (Geochimica et Cosmochimica Acta), 2002, vol. 66, no. 12, pp. 2211–2229.
20. Philpotts A. R., Dickson L. D. *Nature* (Nature), 2000, vol. 406, pp. 59–61.
21. Philpotts A. R., Shi J., Brustman C. *Nature* (Nature), 1998, vol. 395, pp. 343–346.
22. Shaw H. R. *American Journal of Science* (American Journal of Science), 1965, vol. 263, no. 2, pp. 120–152.
23. Sparks R. S. J., Huppert H. E. *Contributions to Mineralogy and Petrology* (Contributions to Mineralogy and Petrology), 1984, vol. 85, pp. 300–309.

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Коротко об авторах

Кирдяшкин Алексей Анатольевич, д-р геол.-минер. наук, профессор РАН, зав. лабораторией физического и химического моделирования геологических процессов, Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН; доцент кафедры общей и региональной геологии геолого-геофизического факультета, Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия. Область научных интересов: лабораторное и теоретическое моделирование геодинамических процессов, тектонофизика, геотектоника
aak@igm.nsc.ru

Кирдяшкин Анатолий Григорьевич, д-р техн. наук, вед. науч. сотрудник лаборатории физического и химического моделирования геологических процессов, Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, заслуженный деятель науки РФ, лауреат Государственной премии РФ, г. Новосибирск, Россия. Область научных интересов: лабораторное и теоретическое моделирование геологических процессов, сочетание геодинамического и петрологического моделирования, использование законов и методов теплофизики в задачах геодинамики, рост кристаллов
agk@igm.nsc.ru

Briefly about the authors

Aleksey Kirdyashkin, doctor of geological and mineralogical sciences, professor, Russian Academy of Sciences, chief of the Laboratory of Physical and Chemical Modeling of Geological Processes, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, associate professor, General and Regional Geology Section, Geology and Geophysics Department, Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia. Sphere of scientific interests: laboratory and theoretical modeling of geodynamic processes, tectonophysics, geotectonics

Anatoly Kirdyashkin, doctor of technical sciences, leading researcher, Physical and Chemical Modeling of Geological Processes laboratory, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, honored scientist of the Russian Federation, State prize of the Russian Federation laureate, Novosibirsk, Russia. Sphere of scientific interests: laboratory and theoretical modeling of geological processes, combination of geodynamic and petrologic modeling, application of principles and methods of thermophysics to geodynamic problems, crystal growth

Образец цитирования

Кирдяшкин А.А., Кирдяшкин А.Г. Влияние кристаллизационной дифференциации на состав остаточного расплава для плагиоклаза при различных p-t условиях // Вестник Забайкальского государственного университета. 2020. Т. 26, № 7. С. 53–61. DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-7-53-61.

Kirdyashkin A., Kirdyashkin A. Influence of crystallization differentiation on the composition of the residual melt for plagioclase under different p-t conditions // Transbaikal State University Journal, 2020, vol. 26, no. 7, pp. 53–61. DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-7-53-61.

Статья поступила в редакцию: 25.08.2020 г.
Статья принята к публикации: 17.09.2020 г.