

УДК 551.2+551.14+552.1
DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-7-44-52

СИЛЫ, ПОРОЖДАЮЩИЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИОННУЮ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЮ, И ЭВОЛЮЦИЯ СОСТАВА РАСПЛАВА НА ПРИМЕРЕ ПЛАГИОКЛАЗА

FORCES GENERATING CRYSTALLIZATION DIFFERENTIATION, AND THE EVOLUTION OF THE MELT COMPOSITION ON THE EXAMPLE OF PLAGIOCLASE



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



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

Исследуются процессы кристаллизационной дифференциации в объеме расплава на примере плагиоклаза, представленного непрерывным рядом твердых растворов альбит – анортит. Показано, что в изотермическом объеме такого расплава существует кристаллизационная дифференциация вследствие гидродинамической неустойчивости в системе расплав – твердые частицы. Оценены временные масштабы процессов кристаллизационной дифференциации в слое расплава толщиной 10 см для различных размеров осаждающихся частиц. В земных условиях большие объемы расплава и длительное время их существования возможны при долгоживущем источнике тепла большой мощности. Таким источником является мантийный термохимический плюм с грибообразной головой. Представлены оценки временных масштабов осаждения твердых частиц для толщины слоя расплава головы плюма, равной 10 км. Представлен метод расчета состава расплава, остающегося после осаждения частиц плагиоклаза. Представлены результаты вычислений изменения состава расплава вследствие кристаллизационной дифференциации при температуре $T = 1410$ °С и давлении $P = 6,3$ кбар. Для расплава, состав которого отвечает N 47,5 (весовое процентное содержание анортита 47,5 %), рассчитаны содержание оксидов в осажденном плагиоклазе, состав расплава в его межкристаллических пространствах и состав остаточного расплава. Процесс кристаллизационной дифференциации расплава, состав которого отвечает плагиоклазу, в условиях постоянной во времени и объеме температуры приводит к изменению первоначального состава расплава. Расчеты состава расплава показали, что в результате осаждения частиц плагиоклаза происходит обеднение расплава анортитовым компонентом и смещение состава расплава к линии ликвидуса диаграммы плавкости плагиоклазов, достигая своего предела на этой линии

Ключевые слова: плагиоклаз; фазовая диаграмма; гидродинамическая неустойчивость; расплав; голова плюма; осаждение твердых частиц; расчеты состава

Crystallization differentiation processes in the melt volume are investigated for albite-anorthite continuous solid solution series. It has shown that crystallization differentiation occurs in the isothermal melt volume due to hydrodynamic instability of the melt/solid particles system. The time of particle settling in a 10 cm thick melt layer is estimated for different particle sizes. In terrestrial conditions, the existence of large melt volumes with long lifetime is possible in the case of a long-lived heat source of high thermal power. This source is a mantle thermochemical plume with a mushroom-shaped head. The particle settling time is estimated for the melt layer thickness, i. e. plume head thickness equal to 10 km. A calculation technique is presented for composition of the melt remaining after settling of plagioclase particles. The results of calculations of changes in the melt composition due to crystallization differentiation at a temperature $T = 1410$ °C and a pressure $P = 6,3$ kbar are presented. For a melt whose composition corresponds to N 47,5 (weight percentage of anorthite is 47,5 %), the oxide content in the settled plagioclase, the composition of the melt in its intercrystalline spaces, and the residual melt composition are calculated. At constant temperature, the crystallization differentiation of the melt whose composition corre-

sponds to plagioclase leads to the compositional changes in the initial melt. Calculations of the melt composition have shown that the melt is depleted in anorthite component owing to settling of plagioclase particles. The composition of plagioclase therewith shifts to the liquidus line, reaching its limit on this line

Key words: plagioclase; phase diagram; hydrodynamic instability; melt; plume head; settling of solid particles; composition calculations

Введение. Развитие задачи о массопереносе в расплаве грибообразной головы термохимического плюма связано с вопросом о кристаллизационной дифференциации расплава как возможном механизме эволюции его состава [3]. Теория кристаллизационной дифференциации магматического расплава разработана Н. Л. Боуэном [10]. Осаждение кристаллов из конвектирующего магматического расплава играет ключевую роль при кристаллизации как гранитных, так и базальтовых магм [7; 15]. Рассматривается роль естественной конвекции в процессах тепло- и массопереноса в магматическом очаге [8; 15; 18]. Важной задачей является выяснение закономерностей изменения плотности остаточного расплава при фракционной кристаллизации магм в случае отделения различных компонентов из расплава [16].

Данная статья является продолжением исследований тепло- и массопереноса и расчетов состава расплава в голове плюма, проведенных в ранних работах [1–4]. Задача, связанная с анализом массообмена в изотермическом объеме расплава, состав которого отвечает плагиоклазу, заключается в исследовании процесса кристаллизационной дифференциации расплава с использованием количественного анализа параметров этого процесса (в частности, времени осаждения твердых частиц), в создании методики количественного определения изменения состава расплава и расчетах состава расплава, остающегося в результате осаждения твердой фазы.

Причины и условия кристаллизационной дифференциации для двухкомпонентной системы альбит – анортит. Рассмотрим, какие силы порождают процесс кристаллизационной дифференциации, и условия, обеспечивающие его устойчивое существование, на примере двухкомпонентной системы, образующей непрерывный ряд твердых растворов альбит – анортит. Для этого, прежде всего, исследуем гидродинамическую устойчивость расплава для двухкомпонент-

ной системы альбит–анортит в изотермических условиях в гравитационном поле. Альбит (Ab) и анортит (An) – это крайние члены изоморфного ряда плагиоклазов. Плагиоклазы – это кальциево-натриевые полевые шпаты, образующие непрерывный ряд твердых растворов. Состав плагиоклаза может изменяться от чисто натриевого члена – альбита, имеющего химическую формулу $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ (в виде оксидов $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$), до чисто кальциевого члена – анортита, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ($\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$) [6].

На рисунке представлена фазовая диаграмма двухкомпонентной системы альбит – анортит. Область гетерогенного равновесия жидких и твердых растворов расположена между кривыми ликвидуса и солидуса. Для состава плагиоклаза, соответствующего 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 земных условиях, т. е., в условиях гравитационного ускорения, твердые частицы, имеющие плотность большую, чем расплав, будут осаждаться под действием силы тяжести.

Состав осаждающихся частиц (кристаллитов) плагиоклаза соответствует точке f (см. рисунок). Состав расплава изменяется 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 (в рассматриваемом случае плагиоклаза) в земных условиях вследствие кристаллизационной дифференциации состав расплава изменяется во времени, смещаясь к линии ликвидуса. Кристаллизационная дифференциация в объеме расплава возникает и существует вследствие гидродинамической

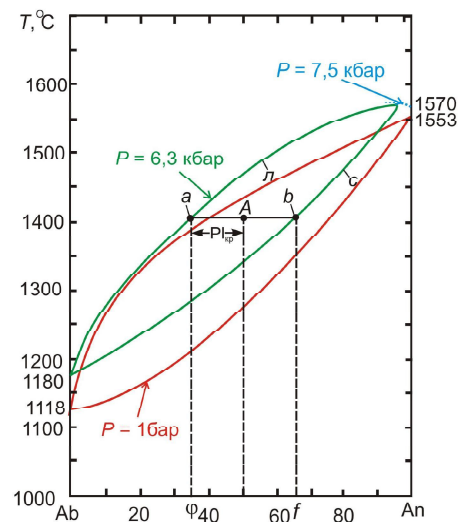
неустойчивости в системе расплав – твердые частицы.

Оценим временные масштабы процессов кристаллизационной дифференциации в расплаве. При давлении $P = 1$ бар, с учетом плотности альбита ($2,6 \text{ г/см}^3$) и анортита ($2,75 \text{ г/см}^3$) [3], для состава расплава, отвечающего плагиоклазу N 30 ($An = 30 \%$) (на линии ликвидуса, см. рисунок) $\rho_1 = 2,65 \text{ г/см}^3$, а для плагиоклаза N 70 ($An = 70 \%$) (на линии солидуса, см. рисунок) $\rho_2 = 2,71 \text{ г/см}^3$. Разность плотностей между расплавом и твердыми частицами плагиоклаза $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1 = 0,06 \text{ г/см}^3$. Скорость осаждения частиц плагиоклаза оценим, используя формулу Стокса для скорости движения шара $U_{\text{ш}}$ радиусом r в вязкой жидкости $U_{\text{ш}} = 2r^2g\Delta\rho/9\eta$, где η – коэффициент динамической вязкости [17]. На основе экспериментальных значений динамической вязкости в системе альбит – анортит для температуры $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ [11] принимаем $\eta = 10^2 \dots 10^3 \text{ Па} \cdot \text{с}$. В объеме расплава со средней плотностью 2670 кг/м^3 и $\eta = 10^2 \text{ Па} \cdot \text{с}$ скорость осаждения шарика радиусом $r = (0,2 \dots 2) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ будет $U_{\text{ш}} = 5,2 \cdot 10^{-9} \dots 5,2 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}$; при $\eta = 10^3 \text{ Па} \cdot \text{с}$ получаем $U_{\text{ш}} = 5,2 \cdot 10^{-9} \dots 5,2 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}$. Для $r = 0,2 \text{ мм}$, $\eta = 10^2 \text{ Па} \cdot \text{с}$ в слое расплава высотой $L = 10 \text{ см}$ время осаждения кристаллов $t = L/U_{\text{ш}}$ будет $t = 1,9 \cdot 10^7 \text{ с} = 0,6 \text{ лет}$. Для $r = 2 \text{ мм}$, той же динамической вязкости и высоты слоя $t = 1,9 \cdot 10^6 \text{ с} = 0,06 \text{ лет}$ (22 суток).

Масштаб времени $t = L/U_{\text{ш}}$ возрастает с высотой слоя расплава. Оценим масштаб времени для процессов, протекающих в земных условиях, например, для толщины слоя расплава $L = 10^4 \text{ м}$ (10 км). При больших временах осаждения кристаллов можно предположить, что в результате процесса агрегации и роста кристаллов их размер может возрасти. Для $r = 0,5 \text{ мм}$, $\eta = 10^2 \dots 10^3 \text{ Па} \cdot \text{с}$ и остальных приведенных параметрах $U_{\text{ш}} = 3,27 \cdot 10^{-7} \dots 3,27 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}$. В этом случае время $t = L/U_{\text{ш}}$ будет составлять $0,97 \cdot 10^3 \dots 9,7 \cdot 10^3 \text{ лет}$. Для $r = 0,2 \text{ мм}$, $\eta = 10^2 \dots 10^3 \text{ Па} \cdot \text{с}$, получаем $t = 6 \cdot 10^3 \dots 60 \cdot 10^3 \text{ лет}$. Для $r = 0,1 \text{ мм}$ и названной динамической вязкости $U_{\text{ш}} = 1,3 \cdot 10^{-9} \dots 1,3 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}$, и время $t = 24,4 \cdot 10^3 \dots 244 \cdot 10^3 \text{ лет}$. Процесс агрегации твердых частиц приводит к увеличению диаметра частиц и скорости их осаждения, т. е. – к уменьшению времени осаждения кристаллов.

В земных условиях большие объемы расплава и длительное время их суще-

ствования возможны при долгоживущем источнике тепла большой мощности. Таким источником может быть мантийный термохимический плюм, поднимающийся (выплавляющийся) от границы ядро – мантия при тепловой мощности на подошве плюма $N = 2,7 \cdot 10^{10} \dots 1,4 \cdot 10^{11} \text{ Вт}$ [12]. В указанном диапазоне тепловой мощности в коровом слое выплавляется грибообразная голова плюма [3; 13]. Плюмы с грибообразной головой могут быть ответственными за формирование крупных интрузивных тел, в том числе, батолитов [12; 13]. Горизонтальные размеры головы плюма $d_f = 100 \dots 300 \text{ км}$, толщина слоя расплава головы плюма $15 \dots 25 \text{ км}$. Время деятельности плюма с грибообразной головой, согласно геологическим данным, составляет $20 \dots 30 \text{ млн лет}$ [3], т. е. много больше, чем оцененное время осаждения твердых частиц в слое расплава. Расплав в голове плюма имеет состав расплавленных пород верхних слоев континентальной коры. Сверхдиабатическая разность температуры в объеме расплава головы плюма $\Delta T_{\text{max}} = 0,1 \dots 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ [3]. Такие условия благоприятны для существования процесса кристаллизационной дифференциации [3; 4].



Фазовая диаграмма плагиоклазов: c – солидус при $P = 6,3 \text{ кбар}$; л – ликвидус при $P = 6,3 \text{ кбар}$; диаграмма плавкости при $P = 1 \text{ бар}$ по [9]; участок фазовой диаграммы при $P = 7,5 \text{ кбар}$ по [2; 14] / Phase diagram of plagioclase feldspars: c – solidus at $P = 6,3 \text{ kbar}$; l – liquidus at $P = 6,3 \text{ kbar}$; melting of plagioclase at $P = 1 \text{ bar}$ after [9]; the portion of the phase diagram at $P = 7,5 \text{ kbar}$ after [2; 14]

Процесс кристаллизационной дифференциации расплава, состав которого отвечает плагиоклазу, в условиях постоянной во времени и объеме температуры приводит к изменению первоначального состава расплава. В результате осаждения частиц плагиоклаза происходит обеднение расплава анортитовым компонентом и смещение состава расплава к линии ликвидуса, достигая своего предела на этой линии.

Изменение состава расплава вследствие кристаллизационной дифференциации при $T = 1410$ °C и $P = 6,3$ кбар. Оценим влияние кристаллизационной дифференциации на состав расплава при $T = 1410$ °C и $P = 6,3$ кбар. Эти значения давления и температуры использовались в наших предыдущих статьях [1–4]. В этом случае состав расплава на линии ликвидуса отвечает плагиоклазу N 34 ($An_n = 34$ %, см. рисунок). Тогда $Ab_n = 66$ %, и отношение содержания анортита и альби-

та $(An/Ab)_n = 0,52$. Как сказано ранее, химические формулы альбита и анортита могут быть представлены в виде оксидов, т. е. для Ab_n имеем формулу $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ и для $An_n - CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$. Результаты расчета химического состава расплава представлены в табл. 1. В таблице M_{ox} – молекулярный вес соответствующего оксида, M_{Ab} и M_{An} – молекулярный вес альбита и анортита соответственно. Согласно данным табл. 1, химический состав плагиоклаза на линии ликвидуса следующий: $SiO_2 = 60,16$ %; $Al_2O_3 = 25,12$ %; $Na_2O = 7,92$ %; $CaO = 6,80$ %.

Состав расплава на линии солидуса отвечает N 66 ($An_c = 66$ %), и, соответственно, $Ab_c = 34$ %, отношение $(An/Ab)_c = 1,94$. Результаты расчета химического состава на линии солидуса представлены в табл. 2. Согласно табл. 2, химический состав расплава на линии солидуса будет $SiO_2 = 51,84$ %; $Al_2O_3 = 30,88$ %; $Na_2O = 4,08$ %; $CaO = 13,20$ %.

Таблица 1 / Table 1

Состав расплава, отвечающего плагиоклазу N 34 (состав на линии ликвидуса) /
The composition of the melt corresponding to plagioclase N 34 (composition on the liquidus line)

Ab_n	M_{ox}	M_{ox}/M_{Ab}	$(M_{ox}/M_{Ab}) \times 66\%$	An_n	M_{ox}	M_{ox}/M_{An}	$(M_{ox}/M_{An}) \times 34\%$	Оксид / Oxide	Содержание, % / Content, %
$6SiO_2$	360,51	0,69	45,54	$2SiO_2$	120,17	0,43	14,62	SiO_2	60,16
Al_2O_3	101,96	0,19	12,54	Al_2O_3	101,96	0,37	12,58	Al_2O_3	25,12
Na_2O	61,98	0,12	7,92	CaO	56,08	0,20	6,80	Na_2O	7,92
								CaO	6,80

Таблица 2 / Table 2

Состав расплава, отвечающего плагиоклазу N 66 (состав на линии солидуса) /
The composition of the melt corresponding to plagioclase N 66 (composition on the solidus line)

Ab_c	M_{ox}/M_{Ab}	$(M_{ox}/M_{Ab}) \times 34$ %	An_c	M_{ox}/M_{An}	$(M_{ox}/M_{An}) \times 66$ %	Оксид / Oxide	Содержание, % / Content, %
$6SiO_2$	0,69	23,46	$2SiO_2$	0,43	28,38	SiO_2	51,84
Al_2O_3	0,19	6,46	Al_2O_3	0,37	24,42	Al_2O_3	30,88
Na_2O	0,12	4,08	CaO	0,20	13,20	Na_2O	4,08
						CaO	13,20

Разности между весовым процентным содержанием на линии ликвидуса и на линии солидуса для каждого оксида будут следующие: $(\Delta SiO_2)_{max} = (SiO_2)_n - (SiO_2)_c = 8,32$ %; $(\Delta Al_2O_3)_{max} = (Al_2O_3)_n - (Al_2O_3)_c = -5,76$ %; $(\Delta Na_2O)_{max} = (Na_2O)_n - (Na_2O)_c = 3,84$ %; $(\Delta CaO)_{max} = (CaO)_n -$

$-(CaO)_c = -6,40$ %. Изменение содержания оксидов вследствие кристаллизационной дифференциации расплава зависит от начального состава расплава и от его температуры.

Определим состав остаточного расплава, который будет после осаждения твер-

дых взвесей плагиоклаза, т. е. вследствие кристаллизационной дифференциации, используя метод, изложенный в статьях [2; 3]. Возьмем начальный состав расплава, отвеча-

ющего N 47,5, при $P = 6,3$ кбар и $T = 1410$ °С: $An = 47,5$ %, $Ab = 52,5$ %, $An/Ab = 0,90$. Химический состав расплава представлен в табл. 3.

Таблица 3 / Table 3

Состав расплава, отвечающего N 47,5 / The composition of melt corresponding to N 47,5

Ab	M_{ox}/M_{Ab}	$(M_{ox}/M_{Ab}) \times 52,5$ %	An	M_{ox}/M_{An}	$(M_{ox}/M_{An}) \times 47,5$ %	Оксид / Oxide	Содержание, % / Content, %
6SiO ₂	0,69	36,23	2SiO ₂	0,43	20,43	SiO ₂	56,66
Al ₂ O ₃	0,19	9,98	Al ₂ O ₃	0,37	17,58	Al ₂ O ₃	27,56
Na ₂ O	0,12	6,30	CaO	0,20	9,50	Na ₂ O	6,30
						CaO	9,50

Для этого случая, согласно диаграмме плавкости плагиоклазов (см. рисунок), доля закристаллизовавшегося плагиоклаза $PI_{кр} = 0,5$, доля расплава также равна 0,5. Состав закристаллизовавшегося плагиоклаза $PI_{кр}$ отвечает N 65, т. е. для $PI_{кр}$ получаем $Ab_{кр} = Ab \times PI_{кр} = 35$ % $\times 0,50 = 17,50$ %; $An_{кр} = An \times PI_{кр} = 65$ % $\times 0,50 = 32,50$ %. Содержание оксидов в $PI_{кр}$ представлено в табл. 4.

Вместе с осажденным плагиоклазом остается приблизительно 26 % расплава в межкристаллических пространствах [5]. С учетом выявленной доли закристаллизовавшегося плагиоклаза $PI_{кр} = 50$ % весовое процентное содержание расплава в межкристаллических пространствах равно $0,26 \times PI_{кр} = 0,26 \times 50$ % = 13 %.

Таблица 4 / Table 4

Содержание оксидов в закристаллизовавшемся плагиоклазе / The oxide content in the crystallized plagioclase

Ab _{кр}	M_{ox}/M_{Ab}	$(M_{ox}/M_{Ab}) \times 17,5$ %	An _{кр}	M_{ox}/M_{An}	$(M_{ox}/M_{An}) \times 32,5$ %	Оксид / Oxide	Содержание, % / Content, %
6SiO ₂	0,69	12,08	2SiO ₂	0,43	13,98	SiO ₂	26,06
Al ₂ O ₃	0,19	3,33	Al ₂ O ₃	0,37	12,03	Al ₂ O ₃	15,36
Na ₂ O	0,12	2,10	CaO	0,20	6,50	Na ₂ O	2,10
						CaO	6,50

Согласно диаграмме плавкости плагиоклазов, состав расплава для рассматриваемых условий соответствует N 34: $Ab_p = 66$ %; $An_p = 34$ % (см. рисунок). Расплав, остающийся после осаждения закристаллизовавшегося плагиоклаза, представлен следующими компонентами: $Ab_{ор} = Ab_{ор} \times (1 - PI_{кр}) = 66$ % $\times (1 - 0,50) = 33$ %; $An_{ор} = An_{ор} \times (1 - PI_{кр}) = 34$ % $\times (1 - 0,50) = 17$ %. Расплав, который остается вместе с осажденным $PI_{кр}$ в межкристаллических пространствах, содержит $Ab_{ор} = 0,13 \times Ab_{ор} = 4,29$ %; $An_{ор} = 0,13 \times An_{ор} = 2,21$ %. Результаты расчета процентного

содержания оксидов для расплава, оставшегося в межкристаллических пространствах осажденного плагиоклаза, представлены в табл. 5.

Расчет суммарного содержания каждого оксида для осажденного плагиоклаза и расплава в межкристаллических пространствах дает SiO₂ = 29,94 %; Al₂O₃ = 16,99 %; Na₂O = 2,61 %; CaO = 6,94 %.

Результаты расчета содержания оксидов для расплава, оставшегося после осаждения частиц плагиоклаза, представлены в табл. 6.

Таблица 5 / Table 5

Состав расплава, оставшегося в межкристаллических пространствах осадченного плагиоклаза /
The composition of the melt which remains with the settled plagioclase

Ab _{оср}	M _{окс} /M _{Ab}	M _{окс} /M _{Ab} × 4,25 %	An _{оср}	M _{окс} /M _{An}	M _{окс} /M _{An} × 2,21 %	Оксид / Oxide	Содержание, % / Content, %
6SiO ₂	0,69	2,93	2SiO ₂	0,43	0,95	SiO ₂	3,88
Al ₂ O ₃	0,19	0,81	Al ₂ O ₃	0,37	0,82	Al ₂ O ₃	1,63
Na ₂ O	0,12	0,51	CaO	0,20	0,44	Na ₂ O	0,51
						CaO	0,44

Таблица 6 / Table 6

Состав исходного и остаточного расплавов / The initial and the residual melt composition

В форме оксидов, % / In the form of oxides, %				
Оксид / Oxide	Исходный расплав / Initial melt	Осадченный плагиоклаз / Settled plagioclase	Изменение содержания в исходном расплаве / Change in the content for the initial melt	Остаточный расплав / Residual melt
SiO ₂	56,66	– 29,94	26,72	61,46
Al ₂ O ₃	27,56	– 16,99	10,57	24,31
Na ₂ O	6,30	– 2,61	3,69	8,49
CaO	9,50	– 6,94	2,56	5,89

После вычитания из состава исходного расплава (табл. 6, стлб. 2) процентного содержания соответствующего оксида осадченного плагиоклаза (стлб. 3) получим изменение содержания оксидов для исходного расплава после осаждения твердых частиц плагиоклаза (стлб. 4).

Процентное содержание оксидов для остаточного расплава представлено в табл. 6 (стлб. 5). Суммировав стлб. 4 ($\Sigma = 43,54 \%$) и умножив его на величину $100/43,53 = 2,30$, вычислим состав остаточного расплава. Процентное содержание оксидов для остаточного расплава изменилось в связи с осаждением твердых частиц (стлб. 3) и уменьшением объема расплава. В результате увеличилось процентное содержание SiO₂ и Na₂O и уменьшение Al₂O₃ и CaO. То есть, произошло обеднение расплава анортитовой составляющей и обогащение альбитовой составляющей.

Вычитая из данных стлб. 5 данные стлб. 2 (табл. 6), получаем для каждого оксида величину изменения состава вследствие кристаллизационной дифференциации. Состав остаточного расплава (табл. 6, стлб. 5) соответствует составу плагиоклаза при $T = 1410 \text{ }^\circ\text{C}$ и $P = 6,3$ кбар на линии ликвидуса (см. рисунок и табл. 1). Например, процентное значение на линии ликвидуса отличается от рассчитанного значения для SiO₂ на 1,30 %, для Al₂O₃ на 0,81 %.

Определение состава остаточного расплава, получающегося вследствие кристаллизационной дифференциации, довольно трудоемкое, а результаты расчетов показывают, что состав остаточного расплава соответствует составу на линии ликвидуса диаграммы плавкости плагиоклазов. В этой связи в дальнейшем изменение процентного состава для различных оксидов вследствие кристаллизационной дифференциации можно определить, зная состав на линии ликвидуса и начальный состав расплава. Например, для $P = 6,3$ кбар, $T = 1410 \text{ }^\circ\text{C}$ изменение состава расплава, отвечающего плагиоклазу N 47,5 (табл. 3), вследствие кристаллизационной дифференциации определим как разность первоначального состава (PIN 47,5) и состава на линии ликвидуса (PIN 34, табл. 2): $\Delta\text{SiO}_2 = (\text{SiO}_2)_{\text{ир}} - (\text{SiO}_2)_{\text{л}} = -3,50 \%$; $\Delta\text{Al}_2\text{O}_3 = (\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{ир}} - (\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{л}} = 2,44 \%$; $\Delta\text{Na}_2\text{O} = (\text{Na}_2\text{O})_{\text{ир}} - (\text{Na}_2\text{O})_{\text{л}} = -1,62 \%$; $\Delta\text{CaO} = (\text{CaO})_{\text{ир}} - (\text{CaO})_{\text{л}} = 2,7 \%$. В этих равенствах индекс "ир" относится к составу исходного расплава.

Заключение. Кристаллизационная дифференциация в объеме расплава в случае плагиоклаза, представляющего непрерывный ряд твердых растворов Ab – An, существует вследствие гидродинамической неустойчивости в системе расплав – твердые частицы.

Время осаждения частиц плагиоклаза в слое расплава толщиной $L = 10$ см для вязко-

сти расплава $\eta = 10^2$ Па · с равно 0,06...0,6 лет при радиусе частиц $r = 0,2...2$ мм. Для толщины слоя расплава $L = 10^4$ м время осаждения кристаллов в объеме расплава может составлять 1...244 тыс. лет для $r = 0,1...0,5$ мм. В земных условиях длительное существование больших объемов магматического расплава возможно в случае долгоживущего теплового источника, каковым является мантийный термохимической плюм с грибообразной головой. Время осаждения твердых частиц в слое расплава много меньше времени существования таких плюмов.

В изотермическом объеме расплава в условиях кристаллизационной диффе-

ренциации состав расплава изменяется во времени. Расчеты состава показали, что в результате осаждения частиц плагиоклаза происходит обеднение расплава анортитовым компонентом и смещение состава остаточного расплава к линии ликвидуса.

В изотермическом объеме расплава, отвечающего плагиоклазу, изменение процентного состава для каждого оксида, происходящее вследствие кристаллизационной дифференциации, равно разности его процентного содержания на линии ликвидуса и его содержания для начального состава расплава.

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 тепломассообмен 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 тепломассообмен 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. Некрасов Б. В. Основы общей химии: в 2 т. Т. 1. М.: Химия, 1973. 656 с.
6. Саранчина Г. М., Шинкарев Н. Ф. Петрография магматических и метаморфических пород. Л.: Недра, 1967. 324 с.
7. 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.
8. Bartlett R. W. Magma convection, temperature distribution, and differentiation // *American Journal of Science*. 1969. Vol. 267, No. 9. P. 1067–1082.
9. Bowen N. L. The melting phenomena of the plagioclase feldspars // *American Journal of Science*. 1913. Vol. 35, No. 210. P. 577–599.
10. Bowen N. L. Crystallization-differentiation in igneous magmas // *Journal of Geology*. 1919. Vol. 27, No. 6. P. 393–430.
11. Cranmer D., Uhlmann D. R. Viscosities in the system albite – anorthite // *Journal of Geophysical Research*. 1981. Vol. 86, No. B9. P. 7951–7956.
12. Kiryashkin A. A., Kiryashkin 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.
13. Kiryashkin A. A., Kiryashkin 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Winter J. D. *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology*. Harlow: Pearson, 2014. 739 p.
18. Worster M. G., Huppert H. E., Sparks R. S. J. Convection and crystallization in magma cooled from above // *Earth and Planetary Science Letters*. 1990. Vol. 101, No. 1. P. 78–89.

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. 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.
6. Saranchina G. M., Shinkarev N. F. *Petrografiya magmaticheskikh i metamorficheskikh porod* (Petrography of magmatic and metamorphic rocks). Leningrad: Nedra, 1967. 324 p.
7. Ariskin A. A., Yaroshevsky A. A. *Geochemistry International* (Geochemistry International), 2006, vol. 44, no. 1, pp. 72–93.
8. Bartlett R. W. Magma convection, temperature distribution, and differentiation. *American Journal of Science* (American Journal of Science), 1969, vol. 267, no. 9, pp. 1067–1082.
9. Bowen N. L. *American Journal of Science* (American Journal of Science), 1913, vol. 35, no. 210, pp. 577–599.
10. Bowen N. L. *Journal of Geology* (Journal of Geology), 1919, vol. 27, no. 6, pp. 393–430.
11. Cranmer D., Uhlmann D. R. *Journal of Geophysical Research* (Journal of Geophysical Research), 1981, vol. 86, no. B9, pp. 7951–7956.
12. 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.
13. Kirdyashkin A. A., Kirdyashkin A. G., Gurov V. V. *Geotectonics* (Geotectonics), 2017, vol. 51, no. 4, pp. 398–411.
14. Lindsley D. H. *Origin of anorthosite and related rocks* (Origin of anorthosite and related rocks). New York: State Museum and Science Service, 1968. P. 39–46.
15. Shaw H. R. *American Journal of Science* (American Journal of Science), 1965, vol. 263, no. 2, pp. 120–152.
16. Sparks R. S. J., Huppert H. E. *Contributions to Mineralogy and Petrology* (Contributions to Mineralogy and Petrology), 1984, vol. 85, pp. 300–309.
17. Winter J. D. *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology* (Principles of Igneous and Metamorphic Petrology). Harlow: Pearson, 2014. 739 p.
18. Worster M. G., Huppert H. E., Sparks R. S. J. *Earth and Planetary Science Letters* (Earth and Planetary Science Letters), 1990, vol. 101, no. 1, pp. 78–89.

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

Коротко об авторах

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

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

Briefly about the authors

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

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

Образец цитирования

Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. Силы, порождающие кристаллизационную дифференциацию, и эволюция состава расплава на примере плагиоклаза // Вестник Забайкальского государственного университета. 2020. Т. 26, № 7. С. 44–52. DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-7-44-52.

Kirlyashkin A., Kirlyashkin A. Forces generating crystallization differentiation, and the evolution of the melt composition on the example of plagioclase // Transbaikal State University Journal, 2020, vol. 26, no. 7, pp. 44–52. DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-7-44-52.

Статья поступила в редакцию: 25.08.2020 г.

Статья принята к публикации: 17.09.2020 г.