

**ВЛИЯНИЕ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА НА СОСТАВ БАЗАЛЬТОВОГО
РАСПЛАВА В ГРИБООБРАЗНОЙ ГОЛОВЕ ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО ПЛЮМА**

**INFLUENCE OF HEAT AND MASS TRANSFER ON COMPOSITION OF BASALTIC
MELT IN THE MUSHROOM-SHAPED HEAD OF THERMOCHEMICAL PLUME**



А. А. Кирдяшкин,
*Институт геологии и
минералогии
им. В. С. Соболева СО РАН,
Новосибирский
государственный
университет, г. Новосибирск
aak@igm.nsc.ru*

A. Kirdyashkin,
*V. S. Sobolev Institute of
Geology and Mineralogy
SB RAS, Novosibirsk State
University, Novosibirsk*



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

A. Kirdyashkin,
*V. S. Sobolev Institute of
Geology and Mineralogy
SB RAS, Novosibirsk*



Н. В. Сурков,
*Институт геологии и
минералогии
им. В. С. Соболева СО РАН,
г. Новосибирск
diagrams@igm.nsc.ru*

N. Surkov,
*V. S. Sobolev Institute of
Geology and Mineralogy
SB RAS, Novosibirsk*

В статье представлено исследование, задача которого заключается в том, чтобы на основе анализа тепло- и массопереноса в рамках предложенной модели термохимического плюма с грибовидной головой выяснить, как изменится состав расплава головы плюма в том случае, если исходный состав расплава в ней – базальтовый. На основе данных экспериментального и теоретического моделирования представлена структура течения в расплаве канала и головы термохимического плюма, поднимающегося (выплавляющегося) от границы ядро – мантия к поверхности. На основе строения фазовой диаграммы модельной системы $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ показано, что в двух верхних конвективных ячейках канала плюма плавление протекает по эвтектическим равновесиям $L=\text{Cr}_x+\text{Or}_x+\text{An}+\text{Sp}$ и $L=\text{Fo}+\text{An}+\text{Cr}_x+\text{Or}_x$. При расширении состава системы щелочным компонентом до системы $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ в этих ячейках появляются условия для кристаллизационной дифференциации как процесса отделения кристаллов плагиоклаза в виде твёрдых растворов серии альбит-анортит. Этот процесс приводит к обогащению остаточного расплава кремнезёмом и щелочным компонентом.

На основе тепловой и гидродинамической структуры головы плюма и данных о химическом составе базальтового расплава в ней представлено возможное изменение состава этого расплава: 1) после осаждения твёрдой фазы (тугоплавких минералов) на подошву головы плюма; 2) после осаждения плагиоклаза в расплаве, образовавшемся после первого этапа. Оценки состава расплава головы плюма показывают, что в результате кристаллизационной дифференциации образуется остаточный расплав, содержание SiO_2 в котором соответствует таковому в коровом слое

Ключевые слова: моделирование; мантийные плюмы; свободноконвективные течения; голова плюма; расплав; время осаждения; нормативный состав; базальты; фазовая диаграмма; плагиоклаз; эвтектическое плавление

A thermochemical plume originates at the core-mantle boundary and ascends (melts up) to the surface. The main research task is to evaluate the compositional changes of melt in the plume head, assuming that the initial composition of melt is basaltic. The evaluations are based on the analysis of heat and mass transfer in the melt of the plume head. The flow structure that developed in a melt of plume head as well as in plume conduit is represented on the basis of experimental and theoretical modeling. Basing on the phase diagram of the CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ model system, the authors have shown that melting in the two upper convection cells of the plume conduit proceeds according to eutectic equilibria $L=Cpx+Opx+An+Sp$ and $L=Fo+An+Cpx+Opx$. In the case of the CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-Na₂O system the crystallization differentiation proceeds as separation of plagioclase crystals (in the form of albite-anorthite solid solutions). This leads to the enrichment of residual melt in silica and alkaline components. Basing on thermal and hydrodynamic structure of the plume head together with the chemical composition of basaltic melt, the authors have estimated the possible compositional changes in the melt.

The calculations were performed in two stages: 1) after settling of refractory minerals; 2) after settling of plagioclase in the melt resulting from the first stage. As a consequence of crystallization differentiation, SiO₂ content in the residual melt is consistent with that of the crustal layer

Key words: modeling; mantle plumes; free-convection flows; plume head; melt; settling time; normative composition; basalts; phase diagram; plagioclase; eutectic melting

Введение. Процесс эволюции состава магматического расплава является центральным в петрологии. Он может быть решен при комплексном изучении изменений состава магматического расплава, происходящих при его подъеме к поверхности, и процессов тепло- и массообмена, протекающих в нем. Таким образом, для всестороннего исследования эволюции состава расплава необходимо совместное решение геодинамической и петрологической задач.

В настоящее время по некоторым модельным системам накоплен достаточно полный материал [10; 13; 14], позволяющий перейти к базовым обобщениям. Четыре компонента этой системы составляют 80...90 масс. % от состава глубинных горных пород, что позволяет считать эту систему достаточно полной моделью для рассмотрения главных вопросов устойчивости глубинных парагенезисов и процессов магомобразования.

С деятельностью мантийных термомохимических плюмов с грибообразной головой, имеющих тепловую мощность $2,7 \cdot 10^{10}$ Вт $< N < 1,4 \cdot 10^{11}$ Вт, связано формирование крупных интрузивных тел в континентальной земной коре, в том числе батолитов [2; 8]. Исследованы гидродинамика и теплообмен в голове плюма, представляющей грибообразный плоский слой расплава корового слоя [8], что позволяет рассмотреть массообмен в расплаве головы плюма и изменение его состава [2]. В пре-

дыдущей статье приведены расчеты состава на основе модели тепловой и гидродинамической структуры плюма с грибообразной головой [Там же]. Расчеты показали состав расплава, близкий к составу нормальных гранитов, в случае, когда голова плюма представляет собой расплав корового слоя. В данной статье, являющейся продолжением исследований [2], на основе анализа тепло- и массопереноса в рамках предложенной модели термомохимического плюма с грибообразной головой выяснено, как изменяется состав расплава головы плюма в том случае, если исходный состав расплава в ней – базальтовый.

Структура канала и головы термомохимического плюма. В вертикальном сечении канал плюма представляет собой систему конвективных ячеек [7] (рис. 1). В областях сужения канала (на границах ячеек) восходящий конвективный поток переходит на противоположную сторону канала. Пограничный слой нисходящего конвективного течения расположен по образующей поверхности канала. Вдоль области восходящего потока происходит плавление, вдоль нисходящего – кристаллизация при уменьшении диаметра канала. Между границей канала и окружающим массивом происходит нестационарный кондуктивный теплообмен. Средний диаметр сужения канала $d_c = 2R_c = 0,5d$, где R_c – средний радиус сужения, d – средний диаметр канала.

В первом приближении будем рассматривать голову плюма как горизонтальный слой толщиной l , длиной d'_r и шириной d''_r , плоскость симметрии, проходящую через ось канала плюма. Сверхадиабатические перепады температуры в расплаве грибовидной головы плюма $\sim 0,2$ °C, поэтому на процессы кристаллизационной дифференциации плагиоклаза в большей степени должно влиять изменение давления по высоте слоя вследствие изменения диаграммы плавкости плагиоклазов с давлением [2].

Структура течения в расплаве сформировавшейся головы плюма представлена на рис. 1 с использованием данных лабораторного моделирования [8]. Существует поток расплава, уходящий вниз в канал мантийного плюма. Теплообмен между расплавом в канале и голове плюма происходит между противоположно направленными свободноконвективными течениями в ламинарном режиме. Диффузионный массообмен между расплавом головы плюма и расплавом сопряженного с ней канала плюма пренебрежимо мал [Там же]. Поэтому расплав в канале плюма является источником тепла для процессов плавления и кристаллизационной дифференциации в голове плюма.

Существуют горизонтальные потоки вдоль верхней и нижней границ зоны расплава в голове плюма (рис. 1). Крупномасштабные горизонтальные свободноконвективные течения в расплаве головы плюма возникают из-за горизонтального градиента температуры в нем. Течения у подошвы головы плюма происходят в условиях устойчивой стратификации из-за теплоотвода в массив под подошвой. В связи с этим течения здесь имеют устойчивый характер и благоприятствуют процессам кристаллизационной дифференциации. При постоянном значении количества тепла, поступающего к расплаву в голове плюма, в течение 20...30 млн лет в голове плюма существуют благоприятные условия для осаждения твердой фазы [2].

Особенности плавления в нормативной части системы CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂. Наиболее распространенным объектом для построения физико-химических моде-

лей является фазовая диаграмма системы CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂. Сравнение фазовых взаимоотношений в модельной системе CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ и в глубинных парагенезисах показывает унаследование характера границ фазовых объемов в них по отношению к указанной системе. Это даёт основания считать систему CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ достаточно полным объектом для моделирования глубинных процессов и пород.

В этой системе для давлений ниже 15 кбар для области составов, отвечающих основным и ультраосновным расплавам, плавление происходит согласно моновариантным равновесиям эвтектического типа $L=Fo+Opx+Cpx+An$ и $L=Cpx+Opx+An+Sp$ (рис. 2). Эти равновесия относятся к эвтектическому тренду щелочноземельной серии пород [13; 14].

В интервале давлений 8...15 кбар плавление происходит согласно моновариантному равновесию $An+Opx+Cpx+Sp=L$ (рис. 2). На ликвидусе присутствуют следующие сочетания твёрдых фаз: $An+Opx+Cpx+L$, $An+Opx+Sp+L$, $An+Cpx+Sp+L$, $Opx+Cpx+Sp+L$, $An+Opx+L$, $Cpx+Sp+L$, $An+Sp+L$, $An+Cpx+L$, $Opx+Cpx+L$, $Opx+Sp+L$, $An+L$, $Opx+L$, $Cpx+L$ и $Sp+L$.

При давлении ниже 8 кбар плавление происходит согласно моновариантному равновесию $L=Fo+An+Cpx+Opx$ (рис. 2). На ликвидусе присутствуют следующие сочетания твёрдых фаз: $L+Fo+An+Cpx$, $L+Fo+An+Opx$, $L+Fo+Cpx+Opx$, $L+An+Cpx+Opx$, $L+Fo+An$, $L+Fo+Opx$, $L+Fo+Cpx$, $L+An+Cpx$, $L+An+Opx$, $L+Cpx+Opx$, $L+Fo$, $L+An$, $L+Cpx$ и $L+Opx$.

В обеих зонах практически во всех кристаллизационных объемах присутствует плагиоклаз. Поэтому процесс кристаллизационной дифференциации плагиоклаза определяет особенности эволюции состава остаточного расплава. Поскольку в модельной системе плагиоклазы представлены только анортитом, эволюция состава расплава останавливается на уровне базальтовых составов.

В составе реальных горных пород всегда содержится некоторое количество щелоч-

ного компонента. В случае кристаллизации плагиоклаза состав остаточного расплава не останется в области кальциевых базальтовых составов. Плагиоклазы образуют непрерывный ряд твердых растворов альбит-анортит [4; 9], а при высоких давлениях фазовые соотношения усложняются инконгруэнтным плавлением анортита [9; 12]. Альбит плавится конгруэнтно от 1118 °С при одной атмосфере до приблизительно 1400 °С при 30...34 кбар [4]. Верхним пределом устойчивости альбита по давлению является моновариантное равновесие $Ab=Jd+Qz$, расположенное в интер-

вале давления 33...34 кбар. Анортит устойчив от атмосферного давления вплоть до 31 кбар [12]. Верхний по давлению предел его устойчивости ограничен моновариантным равновесием $An=Gross+Ky+Qz$. При атмосферном давлении анортит плавится конгруэнтно при 1553 °С (реакция $An=L$) до давления приблизительно 5...7 кбар, выше которого он плавится инконгруэнтно по моновариантному равновесию $An=Cor+L$ до давления 10 кбар, выше по давлению по моновариантному равновесию $An=Cor+Sill(Ky)+L$ и $An=Gross+Ky+L$.

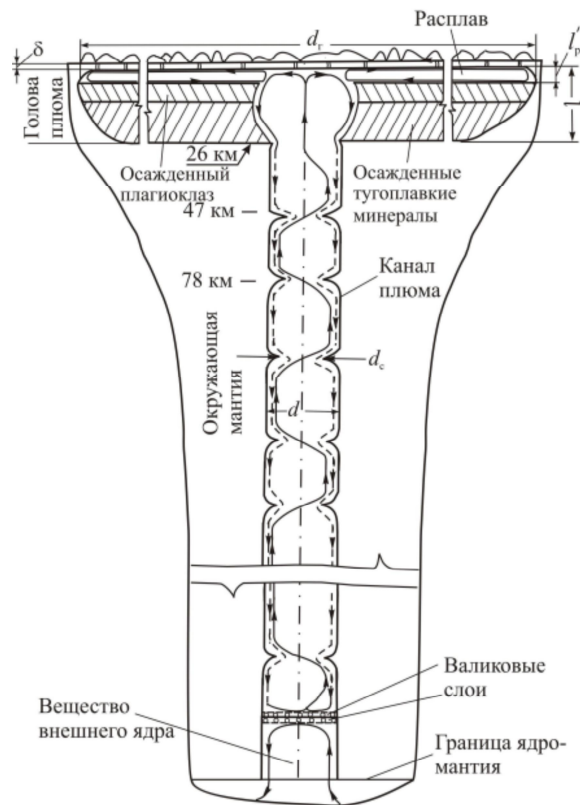


Рис. 1. Схема свободноконвективных течений в расплаве канала и грибовидной головы мантийного плюма (тепловой мощностью $N = 7,6 \cdot 10^{10}$ Вт), построенная с использованием данных лабораторного моделирования: d – диаметр канала плюма; $d_c = 0,5d$ – диаметр сужения канала; d_r – диаметр головы плюма; $l \approx d$ – толщина головы плюма; $l_p' = 3,2...3,6$ км – толщина слоя расплава, остающегося после осаждения частиц плагиоклаза; δ – толщина массива коры над кровлей головы плюма /

Fig. 1. Scheme of free-convection flows in melting chanel and mushroom-shaped head (thermal power of the plume is $N = 7,6 \cdot 10^{10}$ W) constructed using the data of laboratory modeling:

d – plume conduit diameter; $d_c = 0,5d$ – diameter of conduit narrowing zones; d_r – plume head diameter; $l \approx d$ – plume head thickness; $l_p' = 3,2...3,6$ км – thickness of the melt layer remaining after settling of plagioclase; δ – thickness of the block above the roof of the plume head

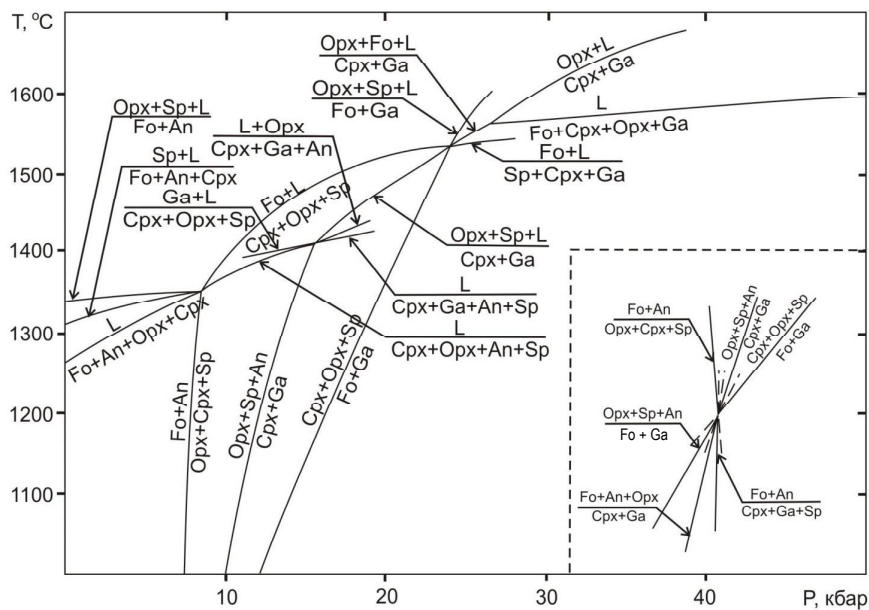


Рис. 2. Главные невариантные равновесия (Cpx, Opx, An, Fo, L) (Cpx, Opx, An, Sp, L) (Cpx, Opx, Ga, Fo, Sp, L), сингулярное невариантное равновесие (Cpx, Opx, Ga, Fo, L) и лучи соединяющих их моновариантных равновесий в форстеритнормативной части системы CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ при высоких давлениях [13; 14] (на врезке показано невариантное равновесие (Cpx, Opx, Ga, Fo, An, Sp), точка которого расположена около 800 °C и 8 кбар): Cpx – клинопироксен; Ga – гранат; Opx – ортопироксен; Sp – шпинель; An – анортит; Fo – форстерит; L – расплав /
 Fig. 2. Main nonvariant equilibria (Cpx, Opx, An, Fo, L) (Cpx, Opx, An, Sp, L) (Cpx, Opx, Ga, Fo, Sp, L), singular nonvariant equilibrium (Cpx, Opx, Ga, Fo, L) and the rays of the monovariant equilibria connect them in the forsterite-normative part of the CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ system at high pressures [13; 14] (the inset shows nonvariant equilibrium (Cpx, Opx, Ga, Fo, An, Sp), the equilibrium point is located near 800 °C and 8 kbar): Cpx – clinopyroxene; Ga – garnet; Opx – orthopyroxene; Sp – spinel; An – anorthite; Fo – forsterite; L – melt

Температуры плавления анортита выше, чем у альбита, а у самого альбита ниже, чем температуры эвтектического щелочноземельного тренда. В пятикомпонентной системе CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-Na₂O, а также природных расплавах при отделении кристаллов плагиоклаза из системы будет удаляться более тугоплавкий кальциевый компонент, а состав остаточного расплава станет более щелочным. Температура плавления понизится и станет ниже температур эвтектического плавления в модельной безщелочной системе, ее состав и состав остаточного расплава перейдет в область щелочных кварцнормативных составов. Этот вывод согласуется с результатами расчетов состава остаточного расплава, основанных на анализе тепло- и массообмена в расплаве грибообразной головы плюма [2]. Дальнейшая эволюция остаточного

расплава будет происходить по котектическим равновесиям в системе клинопироксен (диопсид)-плагиоклаз (анортит-альбит)-кварц [11] до эвтектики плагиоклаз + клинопироксен + кварц.

Изменение состава базальтового расплава в процессе тепло- и массообмена в грибообразной голове плюма. Определяется состав расплава, получившегося вследствие процессов тепло- и массообмена в грибообразной голове плюма в предположении, что исходный состав расплава в ней – базальтовый. Расчеты состава основаны на анализе процессов тепло- и массообмена для случая, когда грибообразная голова плюма достигает своего наибольшего размера, т. е. в установившихся условиях (рис. 1). Расчеты выполнены по способу, предложенному в статье «Тепло- и массообмен и кристаллизационная дифферен-

циация в грибообразной голове термохимического плюма» [2]. Изменение состава расплава определяется поэтапно: 1) после осаждения тугоплавких минералов; 2) после осаждения плагиоклаза в расплаве, образовавшемся после первого этапа и содержащем 88,5 % плагиоклазового компонента (таблица, стлб. 4, нижний ярус). Анализ проводится с использованием данных о химическом составе базальта по Х. С. Йодеру и С. Е. Тилли (базальт № 9) [15] (стлб. 2, верхний ярус). Норматив-

ный состав для него представлен в стлб. 2 (нижний ярус).

Определим состав расплава после осаждения нерасплавленных (тугоплавких) минералов. При температуре расплава, равной $T_p = 1410 \text{ }^\circ\text{C}$ [2], в виде твердых взвесей в расплаве головы плюма остаются минералы: диопсид (Di) – 23,63 %, гиперстен (Hyp) – 17,96 %, магнетит (Mgt) – 3,32 %, ильменит (Ilm) – 5,24 %, апатит (Ap) – 0,63 % (стлб. 2, нижний ярус).

Состав расплава в голове плюма ($T_m = 1410 \text{ }^\circ\text{C}$) / Composition of melt in the plume head ($T_m = 1410 \text{ }^\circ\text{C}$)

В форме оксидов, % / In the form of oxides, %							
Оксид / Oxide	Исходный состав базальта / Initial basalt composition	После осаждения ТМ* / After settling of RM*	Слой расплава I _p / Melt layer I _p	После осаждения PI (P = 2,6 кбар) / After settling of PI (P = 2,6 kbar)	Слой расплава I _p ' (P = 2,6 кбар) / Melt layer I _p ' (P = 2,6 kbar)	После осаждения PI (P = 6,3 кбар) / After settling of PI (P = 6,3 kbar)	Слой расплава I _p ' (P = 6,3 кбар) / Melt layer I _p ' (P = 6,3 kbar)
SiO ₂	50,04	24,01	54,99	22,75	59,63	15,39	62,33
TiO ₂	2,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al ₂ O ₃	13,68	11,88	27,21	8,46	22,18	4,6	18,63
Fe ₂ O ₃	2,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FeO	9,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MnO	0,17	0,15	0,34	0,29	0,76	0,28	1,13
MgO	7,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CaO	11,38	5,1	11,68	3,68	9,65	2,21	8,95
Na ₂ O	2,24	1,94	4,44	1,99	5,22	1,27	5,14
K ₂ O	0,57	0,2	1,15	0,98	2,57	0,94	3,81
P ₂ O ₅	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Σ		43,58		38,15		24,69	
Нормативный состав, % / Normative composition, %							
Компонент / Component							
Qtz	1,37		0,96		2,07		3,74
Or	3,37		6,80		15,19		22,52
Ab	18,95		37,57		44,17		43,49
An	25,59		50,92		29,50		16,51
Di	23,63						
Hyp	17,96						
Mgt	3,32						
Ilm	5,24						
Ap	0,63						

*Примечание. ТМ – тугоплавкие минералы / *Note. RM – refractory minerals.

Содержание указанных тугоплавких минералов в голове плюма равно 50,78 %. В среднем их больше плотности расплава примерно на 25 % [2]. Поэтому произойдет осаждение более плотных кристаллов тугоплавких минералов на подошву головы плюма.

Определено процентное содержание оксидов, составляющих осажденные из расплава твердые взвеси. Например, химическая формула диопсида ($Di = 23,63\%$, стлб. 2 таблицы) может быть представлена в виде оксидов: $CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2$. Их молекулярный вес: $M_{ox}(CaO) = 56,08$, $M_{ox}(MgO) = 40,31$, $M_{ox}(2SiO_2) = 120,17$. Молекулярный вес диопсида: $M_{Di} = M_{ox}(CaO) + M_{ox}(MgO) + M_{ox}(2SiO_2) = 216,56$. Процентное содержание каждого оксида равно $(M_{ox}/M_{Di}) \times 23,63\%$: $CaO - 6,14\%$, $MgO - 4,49\%$, $SiO_2 - 13,00\%$. Аналогично определяется процентное содержание оксидов для осажденного гиперстена ($Hyp = 17,96\%$, стлб. 2), формула которого $(Mg, Fe)_2Si_2O_6$ ($Fe = 50\%$), и в оксидной форме: $MgO \cdot FeO \cdot 2SiO_2$: $MgO - 3,05\%$, $FeO - 5,57\%$, $SiO_2 - 9,34\%$. Таким же образом определяется содержание оксидов в Plm ($FeO \cdot TiO_2$, 5,24 %): FeO (2,48 %), TiO_2 (2,76 %) и Mgt ($FeO \cdot Fe_2O_3$, 3,32 %): FeO (1,03 %), Fe_2O_3 (2,29 %).

Исходя из указанных расчетов, суммарное содержание для каждого оксида: $SiO_2 - 22,4\%$, $FeO - 9,06\%$, $Fe_2O_3 - 2,29\%$, $CaO - 6,12\%$, $MgO - 7,53\%$, $TiO_2 - 2,76\%$. Для расплава в голове плюма пересчет на нормативный состав дает: Or (3,37 %), Ab (18,95 %), An (25,95 %) и Qtz (1,37 %) (стлб. 2).

В межкристаллическом пространстве слоя, слагаемого тугоплавкими минералами, осажденными на подошву головы плюма (рис. 1), остается ~26 % расплава [3]. Для определения массового содержания расплава в межкристаллических пространствах осажденного слоя принимаем, что в первом приближении объем осажденного слоя составляет 50,78 % от объема головы плюма. Весовое процентное содержание расплава в межкристаллическом пространстве осажденного слоя составит

$0,26 \times 50,78 = 13,2\%$. Тогда для расплава, находящегося в межкристаллических пространствах осажденного слоя, получаем: Qtz (SiO_2) = $0,014 \times 13,2\% = 0,18\%$; Or ($K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$) = $0,034 \times 13,2\% = 0,44\%$; Ab ($Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$) = $0,19 \times 13,2\% = 2,5\%$; An ($CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) = $0,26 \times 13,2\% = 3,38\%$.

Суммарное процентное содержание оксидов, оставшихся в межкристаллических пространствах осажденного слоя: $SiO_2 - 3,63\%$, $Al_2O_3 - 1,8\%$, $CaO - 0,17\%$, $Na_2O - 0,3\%$, $K_2O - 0,07\%$. Суммарное значение процентного содержания каждого оксида для осажденных минералов и для расплава в межкристаллических пространствах: $SiO_2 - 26,03\%$, $TiO_2 - 2,76\%$, $Al_2O_3 - 1,8\%$, $Fe_2O_3 - 2,29\%$, $FeO - 9,06\%$, $MgO - 7,53\%$, $CaO - 6,28\%$, $Na_2O - 0,3\%$, $K_2O - 0,07\%$, $P_2O_5 - 0,27\%$. Тогда в пересчете на оксиды процентное содержание твердых взвесей и расплава, захваченного в межкристаллических пространствах, составляет 56,4 %, и поэтому толщина слоя расплава l_p , залегающего над слоем тугоплавких минералов в голове плюма толщиной l , будет $l_p = l(1 - 0,56) = 0,44l$. Для $l = 29...33$ км, $l_p = 12,8...14,5$ км.

Вычитая процентный состав соответствующего осажденного оксида (с учетом расплава в межкристаллических пространствах) из состава базальта (стлб. 2, верхний ярус таблицы), получаем состав расплава (в форме оксидов) в голове плюма толщиной l (стлб. 3, верхний ярус). Например, содержание SiO_2 в расплаве составляет $50,04 - 26,03 = 24,01\%$. Аналогично находим процентное содержание других оксидов в расплаве.

Далее определяется процентное содержание оксидов в слое расплава толщиной l_p . Для этого в таблице суммируем стлб. 3 ($\Sigma = 43,58\%$) и затем умножаем его на величину $100/43,58$. Состав слоя расплава толщиной l_p (в форме оксидов) представлен в таблице (стлб. 4, верхний ярус). Нормативный состав: (6,81 %), Ab (37,57 %) и An (50,91 %) (стлб. 4, нижний ярус).

Скорость осаждения твердых взвесей – кристаллов тугоплавких минералов в расплаве головы плюма можно оценить с использованием формулы Стокса для скорости движения шара $U_{\text{ш}}$ радиусом r в вязкой жидкости: $U_{\text{ш}} = 2r^2g\Delta\rho/9\eta$ (η – динамическая вязкость расплава). Для $h = 10^2 \dots 10^3$ Па · с (при $T = 1400$ °С) [6], $\Delta\rho = 700$ кг/м³ (средняя плотность расплава $\rho = 2670$ кг/м³) и $r = (0,25 \dots 1) \cdot 10^{-3}$ м, $U_{\text{ш}} = 9,5 \cdot 10^{-8} \dots 1,5 \cdot 10^{-5}$ м/с (3...481 м/год). Поскольку горизонтальные свободноконвективные течения в расплаве головы плюма у ее кровли и подошвы направлены противоположно друг другу, то время осаждения частиц тугоплавких минералов $t_{\text{ос.т}} = (l - l_p)/2U_{\text{ш}}$. Для $l = 29$ км и $l_p = 12,8$ км, получаем $t_{\text{ос.т}} = 17 \dots 2700$ лет. Время $t_{\text{ос.т}}$ много меньше времени существования плюма с грибообразной головой $t_{\text{шт}} = 15 \dots 30$ млн лет [2].

После осаждения тугоплавких минералов в расплаве большую долю составляет плагиоклазовый компонент – 88,48 % (таблица, стлб. 4). Количество плагиоклазового компонента определяем по диаграмме плавления плагиоклаза для системы альбит – анортит Ab_1 - An_1 при различных давлениях, где $Ab_1 = Ab/(Ab + An)$, $An_1 = An/(Ab+An)$, Ab и An – процентное содержание альбита и анортита после осаждения тугоплавких минералов [Там же].

Закристаллизовавшийся плагиоклаз находится в химическом равновесии с расплавом. Однако в поле силы тяжести закристаллизовавшийся плагиоклаз находится в расплаве в гидродинамически неустойчивом состоянии из-за различия в плотности расплава и закристаллизовавшегося плагиоклаза [2].

Рассмотрим этап осаждения плагиоклаза. На осаждении твердых взвесей сказывается гидродинамика и теплообмен в расплаве, а также изменение литостатического давления с глубиной. После осаждения тугоплавких фаз в расплаве головы плюма содержится Ab – 37,57 % и An – 50,92 % (таблица, стлб. 4), и соответственно, Ab_1 – 42,5 % и An_1 – 57,5 %. При осаждении кристаллов плагиоклаза будет

увеличиваться содержание плагиоклаза на нижележащих уровнях головы плюма по сравнению с равновесным для данного давления. Для достижения химического равновесия расплава и закристаллизовавшегося плагиоклаза эти излишки должны быть расплавлены при наличии тепловой энергии. В рассматриваемом случае происходит отвод тепла от подошвы головы плюма. Поэтому по мере увеличения давления, т. е. по мере приближения к подошве плюма и на подошве плюма будет происходить обогащение расплава закристаллизовавшимся плагиоклазом.

Количество закристаллизовавшегося плагиоклаза в объеме расплава головы плюма будем определять при следующих условиях в окрестности подошвы головы плюма: $P_n = 6,3$ кбар и $T_p = 1410$ °С. Исходим из того, что за время существования плюма произойдет осаждение закристаллизовавшегося плагиоклаза и сформируется слой, представленный осажденным плагиоклазом и залегающий над слоем осажденных тугоплавких минералов (рис. 1).

При $P_n = 6,3$ кбар доля закристаллизовавшегося плагиоклаза $Pl_{\text{I крист}} = 0,79$, доля расплава – 0,21. Состав закристаллизовавшегося плагиоклаза $Pl_{\text{I крист}}$ отвечает N 65, состав расплава отвечает N 30. Процентный состав закристаллизовавшегося $Pl_{\text{I крист}}$: $Ab_{\text{крист}} = Ab_{\text{I крист}}(Ab + An)Pl_{\text{I крист}} = 35\% \times 0,885 \times 0,79 = 24,50\%$, $An_{\text{крист}} = An_{\text{I крист}}(Ab + An)Pl_{\text{I крист}} = 65\% \times 0,885 \times 0,79 = 45,40\%$.

Далее, используя схему расчетов, представленную ранее, находим процентный состав оксидов в закристаллизовавшемся плагиоклазе. Вместе с осажденным плагиоклазом $Pl_{\text{I крист}}(Ab_{\text{крист}} + An_{\text{крист}}) = 0,79 \times 88,5\% = 70\%$ остается расплав в межкристаллических пространствах: $0,26 \times 70\% = 18,20\%$. В пересчете на нормативный состав расплав представлен смесью следующих компонентов: $Qtz = 0,68\%$, $Or = 6,81\%$, $Ab = [Ab_{\text{I крист}}(Ab + An)(1 - Pl_{\text{I крист}})] = 12,82\%$, $An = [An_{\text{I крист}}(Ab + An)(1 - Pl_{\text{I крист}})] = 5,50\%$. Расплав, остающийся вместе с осажденным плагио-

клязом, содержит: $Qtz = 0,68 \times 0,182 = 0,12 \%$, $Or = 6,81 \times 0,182 = 1,24 \%$, $Ab = 12,82 \times 0,182 = 2,33 \%$, $An = 5,50 \times 0,182 = 1,0 \%$.

Далее определяем процентное содержание оксидов для расплава, оставшегося в межкристаллических пространствах осажденного плагиоклаза. Суммарное значение процентного содержания для каждого оксида для осажденных минералов и расплава в межкристаллических пространствах: $SiO_2 - 39,6 \%$, $Al_2O_3 - 22,71 \%$, $Na_2O - 3,17 \%$, $CaO - 9,47 \%$, $K_2O - 0,21 \%$.

Доля осажденных минералов и расплава в межкристаллическом пространстве составляет $0,75$ и толщина слоя расплава l'_p , оставшегося после осаждения твердых взвесей плагиоклаза (рис. 1), $l'_p = (1 - 0,75)l_p = 0,25l_p$. Поскольку $l_p = 0,44l$, то $l'_p = 0,11l$, т. е. составляет 11% от толщины головы плюма l . Для $l = 29...33$ км, $l_p = 12,8...14,5$ км, и тогда $l'_p = 3,2...3,6$ км. Учитывая нормативное содержание Ab и An (таблица, стлб. 4), берем $\eta \approx 10^2$ Па · с ($T = 1400^\circ C$) [6], для $\Delta\rho = 0,06$ г/см³ = 60 кг/м³ и $r = (0,5...2) \cdot 10^{-3}$ м получаем скорость осаждения твердых частиц плагиоклаза $U_m = 3,3 \cdot 10^{-7}...5,2 \cdot 10^{-6}$ м/с (10...165 м/год). Для $l_p = 12,8$ км и $l'_p = 3,2$ км время осаждения $t_{oc,pl} = (l_p - l'_p)/2U_m = 29...466$ лет, т. е., $t_{oc,pl} \ll t_{мнт}$.

После вычитания из стлб. 4 таблицы процентного содержания соответствующего оксида для осажденных частиц плагиоклаза получаем состав расплава, нормированный на толщину l'_p (стлб. 7, верхний ярус). Определим процентное содержание оксидов в расплаве головы плюма толщиной l'_p , получившемся после осаждения плагиоклаза. Суммировав стлб. 7 таблицы ($\Sigma = 24,69 \%$) и умножив его на величину $100/24,69$, получаем процентное содержание оксидов в слое остаточного расплава толщиной l'_p , представленное в стлб. 8. Как следует из стлб. 8, содержание $SiO_2 - 62,33 \%$.

Итак, расчеты показывают, что в результате тепло- и массопереноса и кристаллизационной дифференциации базальтового расплава, имеющего 50% SiO_2 [15],

содержание SiO_2 в остаточном расплаве $59,6...62,3 \%$ (таблица, стлб. 6, 8), т. е. увеличивается до значений, соответствующих его содержанию в коровом слое ($57,4...63,0 \%$) [1].

Выводы. На основе данных лабораторного и теоретического моделирования рассмотрена структура свободноконвективных течений в расплаве канала и грибообразной головы термохимического плюма. Существует поток расплава, уходящий вниз, в канал мантийного плюма и взаимодействующий с восходящим потоком горизонтальной конвективной ячейки в расплаве головы плюма. Теплообмен между расплавом в канале и голове плюма происходит между противоположно направленными свободноконвективными течениями в ламинарном режиме. Крупномасштабные горизонтальные свободноконвективные течения в расплаве головы плюма обусловлены горизонтальным градиентом температуры. Они существуют в условиях устойчивой стратификации из-за теплоотвода в массив под подошвой головы плюма. В связи с этим течения вблизи подошвы имеют устойчивый характер и благоприятствуют процессам кристаллизационной дифференциации.

В двух верхних конвективных ячейках плюма эволюция магматического процесса определяется эвтектическими моновариантными равновесиями $L=Cpx+Orx+An+Sp$ $L=Fox+An+Cpx+Orx$. При расширении состава системы до $CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-Na_2O$ начинает работать механизм кристаллизационной дифференциации в виде отделения кристаллов плагиоклаза альбит-анортитового ряда. Результат этого процесса в значительной мере зависит от тепловой мощности термохимического плюма.

На основе модели тепловой и гидродинамической структуры грибообразной головы плюма представлены результаты исследований гидродинамики и теплообмена в голове плюма и эволюция состава базальтового расплава в ней. Доля остаточного расплава, образовавшегося вследствие кристаллизационной дифференциации, составляет 11% от всего объема расплава в голове плюма. В результате тепло- и массо-

переноса и кристаллизационной дифференциации базальтового расплава, имеющего 50 % SiO_2 , содержание SiO_2 в остаточном расплаве увеличивается до значения, соответствующего его содержанию в коровом слое.

Список литературы

1. Войткевич Г. В., Кокин А. В., Мирошников А. Е., Прохоров В. Г. Справочник по геохимии. М.: Недра, 1990. 480 с.
2. Кирдяшкин А. Г., Кирдяшкин А. А., Гладков И. Н., Дистанов В. Е. Тепло- и массообмен и кристаллизационная дифференциация в грибообразной голове термохимического плюма // Вестник Забайкал. гос. ун-та. 2018. Т. 24, № 2. С. 4–13.
3. Некрасов Б. В. Основы общей химии: в 2 т. М.: Химия, 1973. Т. 1. 656 с.
4. Bell P. M., Roseboom E. H. Melting relationships of jadeite and albite to 45 kilobars with comments on melting diagrams of binary systems at high pressures // Mineralogical Society of America Special Paper. 1969. No. 2. P. 151–161.
5. Bowen N. L. The melting phenomena of the plagioclase feldspars // American Journal of Science. 1913. Vol. 35. No. 210. P. 577–599.
6. Cranmer D., Uhlmann D. R. Viscosities in the system albite-anorthite // Journal of Geophysical Research. 1981. Vol. 86. No. B9. P. 7951–7956.
7. Gladkov I. N., Distanov V. E., Kirdyashkin A. A., Kirdyashkin A. G. Stability of a melt/solid interface with reference to a plume channel // Fluid Dynamics. 2012. Vol. 47. No. 4. P. 433–447.
8. 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.
9. Lindsley D. H. Melting relations of plagioclase at high pressures // Origin of Anorthosite and Related Rocks. New York, 1968. P. 39–46.
10. MacGregor I. D. Stability fields of spinel and garnet peridotites in the synthetic system $\text{MgO-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ // Carnegie Institution of Washington Yearbook. 1965. Vol. 64. P. 126–134.
11. Schairer J. F., Yoder H. S. The nature of residual liquids from crystallization, with data on the system nepheline-diopside-silica // American Journal of Science. 1960. Vol. 258-A. P. 273–283.
12. Surkov N. V., Doroshev A. M. Phase diagram of the $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ system at pressures up to 40 kbar // Russian Geology and Geophysics. 1998. Vol. 39. No 9. P. 1254–1268.
13. Surkov N. V., Gartvich Yu. G. Physicochemical model for the crystallization of rocks of the calc-alkaline series // Geochemistry International. 2012. Vol. 50. No. 10. P. 799–815.
14. Surkov N. V., Gartvich Yu. G. Modeling of deep-seated high-alumina parageneses on the basis of the stability fields of corundum- and spinel-normative assemblages of the system $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ // Russian Geology and Geophysics. 2012. Vol. 53. P. 51–61.
15. Yoder H. S., Tilley C. E. Origin of basalt magmas: an experimental study of natural and synthetic rock systems // Journal of Petrology. 1962. Vol. 3. No. 3. P. 342–532.

References

1. Voytkевич G. V., Kokin A. V., Miroshnikov A. E., Prokhorov V. G. *Spravochnik po geohimii* (Reference book on geochemistry). Moscow: Nedra, 1990. 480 p.
2. Kirdyashkin A. G., Kirdyashkin A. A., Gladkov I. N., Distanov V. E. *Vestnik Zabaykal. gos. un-ta* (Transbaikal State University Journal), 2018, vol. 24, no. 2, pp. 4–13.
3. Nekrasov B. V. *Osnovy obshchey himii: v 2 t.* (Basics of General Chemistry: in 2 volumes). Moscow: Chemistry, 1973, vol. 1. 656 p.
4. Bell P. M., Roseboom E. H. *Mineralogical Society of America Special Paper* (Mineralogical Society of America Special Paper), 1969, no. 2, pp. 151–161.
5. Bowen N. L. *American Journal of Science* (American Journal of Science), 1913, vol. 35, no. 210, pp. 577–599.
6. Cranmer D., Uhlmann D. R. *Journal of Geophysical Research* (Journal of Geophysical Research), 1981, vol. 86, no. b9, pp. 7951–7956.
7. Gladkov I. N., Distanov V. E., Kirdyashkin A. A., Kirdyashkin A. G. *Fluid Dynamics* (Fluid Dynamics), 2012, vol. 47, no. 4, pp. 433–447.
8. Kirdyashkin A. A., Kirdyashkin A. G., Gurov V. V. *Geotectonics* (Geotectonics), 2017, vol. 51, no. 4, pp. 398–411.
9. Lindsley D. H. *Origin of Anorthosite and Related Rocks* (Origin of Anorthosite and Related Rocks). New York, 1968, pp. 39–46.

10. MacGregor I. D. *Carnegie Institution of Washington Yearbook* (Carnegie Institution of Washington Yearbook), 1965, vol. 64, pp. 126–134.
11. Schairer J. F., Yoder H. S. *American Journal of Science* (American Journal of Science), 1960, vol. 258-a, pp. 273–283.
12. Surkov N. V., Doroshev A. M. *Russian Geology and Geophysics* (Russian Geology and Geophysics), 1998, vol. 39, no. 9, pp. 1254–1268.
13. Surkov N. V., Gartvich Yu. G. *Geochemistry International* (Geochemistry International), 2012, vol. 50, no. 10, pp. 799–815.
14. Surkov N. V., Gartvich Yu. G. *Russian Geology and Geophysics* (Russian Geology and Geophysics), 2012, vol. 53, pp. 51–61.
15. Yoder H. S., Tilley C. E. *Journal of Petrology* (Journal of Petrology), 1962, vol. 3, no. 3, pp. 342–532.

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, 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, ведущий научный сотрудник, лаборатория 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

Сурков Никита Викторович, канд. геол.-минер. наук, доцент, старший научный сотрудник, лаборатория физического и химического моделирования геологических процессов, Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия. Область научных интересов: петрология, магматизм, экспериментальные исследования при высоких давлениях, физико-химический анализ
diagrams@igm.nsc.ru

Briefly about the authors

Alexey Kirdyashkin, doctor of geology and mineralogy sciences, professor, Russian Academy of Sciences, chief of Physical and Chemical Modeling of Geological Processes laboratory, V. S. 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, V. S. 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

Nikita Surkov, candidate of geological and mineralogical sciences, associate professor, senior researcher, Physical and Chemical Modeling of Geological Processes laboratory, V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia. Sphere of scientific interests: petrology, magmatism, experimental researches at high pressures, physico-chemical analysis

Работа выполнена в рамках государственного задания, проект № 0330 2016 0016

Образец цитирования

Кирдяшкин А. А., Кирдяшкин А. Г., Сурков Н.В. Влияние тепло- и массообмена на состав базальтового расплава в грибовидной голове термохимического плюма // Вестн. Забайкал. гос. ун-та. 2018. Т. 24. № 10. С. 21–31. DOI: 10.21209/2227-9245-2018-24-10-21-31.

Kirdyashkin A., Kirddyashkin A., Surkov N. Influence of heat and mass transfer on composition of basaltic melt in the mushroom-shaped head of thermochemical plume // Transbaikal State University Journal, 2018, vol. 24, no. 10, pp. 21–31. DOI: 10.21209/2227-9245-2018-24-10-21-31.

Статья поступила в редакцию: 01.11.2018 г.

Статья принята к публикации: 03.12.2018 г.