

ТЕПЛО- И МАССООБМЕН И КРИСТАЛЛИЗАЦИОННАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ В ГРИБООБРАЗНОЙ ГОЛОВЕ ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО ПЛЮМА

HEAT AND MASS TRANSFER AND CRYSTALLIZATION DIFFERENTIATION IN THE MUSHROOM-SHAPED HEAD OF THERMOCHEMICAL PLUME



А. Г. Кирдяшкин,
Институт геологии и
минералогии
им. В.С. Соболева
Сибирского отделения
Российской академии
наук, г. Новосибирск
agh@igm.nsc.ru

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



А. А. Кирдяшкин,
Институт геологии и
минералогии
им. В.С. Соболева
Сибирского отделения
Российской академии
наук, 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



И. Н. Гладков,
Институт геологии и
минералогии
им. В.С. Соболева
Сибирского отделения
Российской академии
наук, г. Новосибирск
kir@igm.nsc.ru

I. Gladkov,
V. S. Sobolev Institute of
Geology and Mineralogy
SB RAS, Novosibirsk



В. Е. Дистанов,
Институт геологии и
минералогии
им. В.С. Соболева
Сибирского отделения
Российской академии
наук, г. Новосибирск
dist@igm.nsc.ru

V. Distanov,
V. S. Sobolev Institute of
Geology and Mineralogy
SB RAS, Novosibirsk

В статье представлено исследование, суть которого заключается в определении закономерностей тепло- и массопереноса в расплаве, образующемся вследствие плавления корового слоя, для которого хорошо известен средний химический состав. При плавлении земной коры источником тепла служит мантийный термохимический плюм. На основе данных лабораторного и теоретического моделирования представлена тепловая и гидродинамическая структура грибовидной головы термохимического плюма. На основе модели тепловой и гидродинамической структуры головы плюма и среднего химического состава земной коры представлено возможное изменение состава расплава в голове плюма последовательно для двух этапов: после осаждения тугоплавких минералов на подошву головы плюма; после осаждения плагиоклаза в расплаве, образовавшемся после первого этапа. Результаты расчетов состава расплава головы плюма представлены для температуры расплава в голове плюма $T_{пл} = 1410$ и 1380 °С. Отмечено, что остаточный расплав, образовавшийся в результате кристаллизационной дифференциации, по составу оказался близким к нормальным гранитам. В течение времени существования плюма расплав под действием сверхлитостатического давления у кровли плюма внедряется в массив над ней

Ключевые слова: моделирование; голова плюма; свободноконвективные течения; тепловая мощность; расплав; кристаллизационная дифференциация; тугоплавкие минералы; плагиоклазы; нормативный состав; баболиты

The main research task is to analyze the heat and mass transfer of melt resulting from melting of the crustal layer for which the bulk composition is well estimated. During melting the heat source is the thermochemical mantle plume. On the basis of laboratory and theoretical modeling results, we present the thermal and hydrodynamic structure of the thermochemical plume with the mushroom-shaped head. Relying on the model of thermal and hydrodynamic structure of the plume head we analyze the possible compositional change of melt by two stages: after settling of refractory mineral particles on the base of the plume head; after settling of plagioclase in the melt subsequent to the first stage. The results of composition calculation are presented for melt of the plume head, having a temperature of $T_m = 1410$ °C and $T_m = 1380$ °C. The normative composition of the residual melt resulting from crystallization differentiation approaches that of normal granites. Throughout the plume lifetime melt intrudes into the block above the plume head under the effect of the superlithostatic pressure

Key words: Modeling; plume head; free-convection flows; thermal power; melt; crystallization differentiation; refractory minerals; plagioclase feldspars; normative composition; batholiths

Введение. В исследованиях мантийных термохимических плюмов главным образом развивается численное моделирование их формирования и динамики [5; 14]. При этом под термохимическим плюмом понимается свободноконвективный восходящий поток (термик) и учитываются изменения плотности, обусловленные вариациями состава. В моделировании «стартовых плюмов» происходит подпитка модельного плюма легкой жидкостью, он состоит из относительно тонкого питающего канала и большой «головы» [13]. Предложена модель термохимического плюма, формирующегося на границе ядро-мантия при наличии теплового потока из внешнего ядра и локальном поступлении химической добавки, понижающей температуру плавления мантии [10]. Плюмы с грибовидной головой имеют тепловую мощность $2,7 \cdot 10^{10} \text{ Вт} < N < 1,4 \cdot 10^{11} \text{ Вт}$ и могут быть ответственны за образование крупных интрузивных тел, в том числе батолитов [11].

Получили развитие химические и петрологические модели образования гранитов. Основная роль в экспериментах отводится изучению влияния воды на понижение температуры плавления [7]. Однако создание моделей образования гранитов требует комплексного подхода: в модельных построениях необходимо определить источник тепла и его параметры (размеры, тепловую мощность). Таким образом, петрологические модели должны сочетаться с моделями тепловой и гидродинамической

структуры термохимического плюма. В этом случае становится возможным обоснование справедливости идей и гипотез, положенных в основу той или иной петрологической модели.

Тепловая и гидродинамическая структура плюма. Термохимический плюм поднимается (выплавляется) от границы ядро-мантия к поверхности до уровня, на котором происходит образование канала излияния; по нему расплав из канала плюма изливается на поверхность. Канал плюма представляет собой расплав, в котором создается система конвективных ячеек, разделенных областями сужения. При тепловой мощности плюма $2,7 \cdot 10^{10} \text{ Вт} < N < 1,4 \cdot 10^{11} \text{ Вт}$ после излияния расплава из канала плюма на поверхность происходит плавление корового слоя, вследствие которого образуется грибовидная голова плюма [11].

Структура течения в расплаве головы плюма представлена на рис. 1 на основе данных лабораторного и теоретического моделирования [Там же]. Восходящий свободноконвективный поток расплава находится в центральной части головы плюма. Он растекается вдоль кровли головы плюма, и затем в канал плюма уходят два нисходящих потока (рис. 1). Вдоль кровли и подошвы слоя расплава головы плюма существуют горизонтальные потоки, обусловленные горизонтальным градиентом температуры. Крупномасштабные горизонтальные течения у кровли головы плюма неустойчивы из-за неустойчивой стратификации и нестационарных валиковых тече-

ний у кровли. Горизонтальные крупномасштабные течения у подошвы головы плюма (в нижней части слоя расплава) существуют в условиях устойчивой стратификации, создающейся вследствие отведения тепла в массив под подошвой. Эти течения имеют устойчивый характер и могут благоприят-

ствовать процессам кристаллизационной дифференциации. Расплав, выдавленный в разломные зоны корового массива под действием силы сверхлитостатического давления, замещается расплавом из подъемного потока под кровлей грибовидной головы плюма (рис. 1).

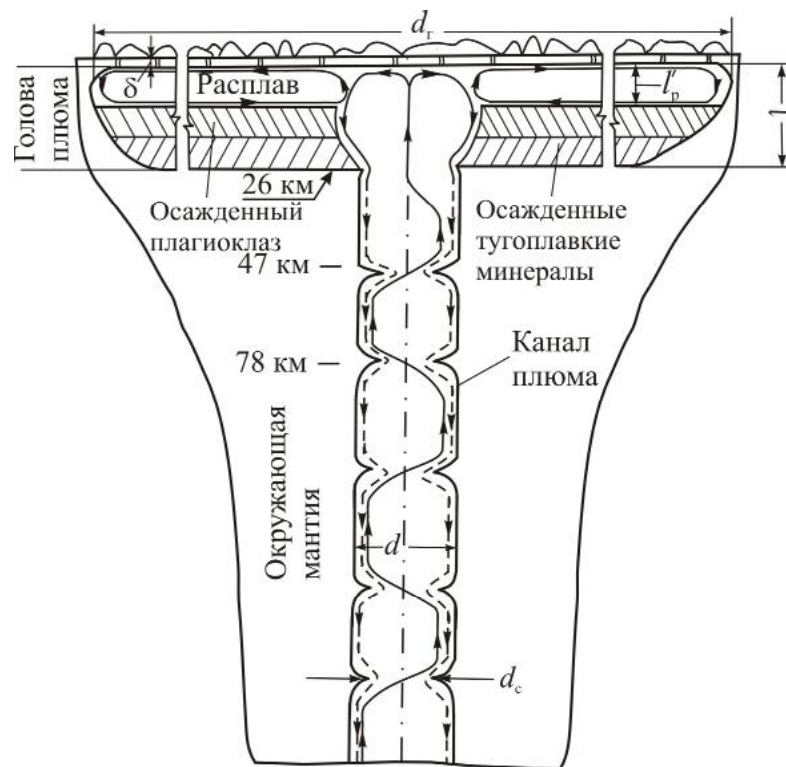


Рис. 1. Схема свободноконвективных течений в расплаве канала и грибовидной головы плюма, построенная с учетом данных лабораторного моделирования. Схема выполнена в масштабе относительно диаметра канала плюма d для случая Хангайского батолита. Размеры канала и головы плюма на схеме соответствуют рассчитанным размерам для Хангайского плюма. Показаны уровни (км), отвечающие первым двум конвективным ячейкам канала плюма: d_r – диаметр головы плюма; d – толщина корового слоя над головой плюма; d_c – диаметр сужения канала плюма / Fig. 1. Scheme of free-convection flows in melt of the plume conduit and the mushroom-shaped plume head, constructed with consideration for data of laboratory modeling. Scheme is in the scale relative to the diameter of the plume conduit d in the case of Khangay batholith. The sizes of the plume conduit and head in the picture correspond to the calculated sizes for the Khangay plume. The levels (km), corresponding to the first two convective cells of the plume conduit, are shown: d_r is the plume head diameter; d is the thickness of the crustal layer above the plume head; d_c is the diameter of narrowing zones of the plume conduit

В расплаве грибовидной головы плюма может находиться твердая фаза – твердые взвеси тугоплавких минералов, имеющих более высокую температуру плавления и более высокую плотность, чем расплав. При стационарном режиме теплообмена, когда количество тепла, подведенного к

голове плюма, равно количеству тепла, переданного к дневной поверхности, твердые частицы будут осаждаться в расплаве под действием силы тяжести. Таким образом, на подошве головы плюма может сформироваться слой, слагаемый осажденными тугоплавкими частицами (рис. 1).

Сверхадиабатические перепады температуры в грибообразной голове плюма порядка 0,2 °С [11]. Поэтому температура расплава T_p оказывается примерно равной температуре плавления $T_{пл}$ материала головы плюма. На процессы кристаллизационной дифференциации в большей степени должно влиять изменение давления по высоте слоя расплава, вследствие изменения диаграммы плавкости плагиоклазов с давлением. При постоянном значении количества тепла, поступающего к голове плюма ($\Delta N = \text{const}$), в течение времени существования плюма ($t_{\text{жизн}} = 15...30$ млн лет) в ней присутствуют благоприятные условия для осаждения твердой фазы.

Расчет состава расплава головы плюма. Исследование гидродинамики и

теплообмена в грибообразной голове плюма тесно связано с необходимостью расчета состава расплава в ней. Состав расплава в голове плюма представлен далее в таблице. Изменение состава расплава определяется поэтапно:

1) после осаждения тугоплавких минералов;

2) после осаждения плагиоклаза в расплаве, образовавшемся после первого этапа и содержащем 61,5 % плагиоклазового компонента (стлб. 4, нижний ярус таблицы). Анализ проводится с использованием оценок среднего химического состава континентальной коры по А. Ронову и А. Ярошевскому [2] (стлб. 2, верхний ярус).

Состав расплава в голове плюма / Composition of melt in the plume head

В форме оксидов, % / In the form of oxides, %							
Оксид/ Oxide	Средний состав коры / Bulk crust composition	После осаждения ТМ / After settling of RM ¹	Слой расплава l_p / Melt layer l_m	После осаждения Pl ($T_p = 1410^\circ\text{C}$) / After settling of Pl ($T_m = 1410^\circ\text{C}$)	Слой расплава l_p' ($T_p = 1410^\circ\text{C}$) / Melt layer l_m' ($T_m = 1410^\circ\text{C}$)	После осаждения Pl ($T_p = 1380^\circ\text{C}$) / After settling of Pl ($T_m = 1380^\circ\text{C}$)	Слой расплава l_p' ($T_p = 1380^\circ\text{C}$) / Melt layer l_m' ($T_m = 1380^\circ\text{C}$)
SiO ₂	59,30	43,87	65,29	41,94	76,12	35,69	75,95
TiO ₂	0,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al ₂ O ₃	15,00	13,86	20,6	7,53	13,67	6,72	14,3
Fe ₂ O ₃	2,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FeO	5,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MnO	0,10	0,10	0,15	0,13	0,24	0,13	0,28
MgO	4,90	0,60	0,89	0,00	0,00	0,00	0,00
CaO	7,20	4,54	6,76	1,37	2,49	0,83	1,71
Na ₂ O	2,50	2,31	3,44	1,60	2,90	1,14	2,43
K ₂ O	2,10	1,91	2,84	2,54	4,61	2,49	5,30
P ₂ O ₅	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Σ		67,19		55,11		47,00	
Нормативный состав, % / Normative composition, %							
Компонент / Component							
Qtz	13,57		18,72		36,43		37,63
Or	12,41		16,78		27,24		31,32
Ab	21,15		29,11		24,54		20,56
An	23,51		32,38		10,67		8,48
Di	8,88		0,91				
Hyp	15,21						
Mgt	3,48						
Ilm	1,33						
Ap	0,46						

¹Примечание. ТМ – тугоплавкие минералы / ¹Note. TM – refractory minerals

Пересчет химического состава расплава головы плюма на нормативный состав осуществляется с использованием таблицы MS Excel (автор: G. Stern, Орлеан, Франция), созданной для пересчета по методу CPW. Сначала определим состав расплава после осаждения нерасплавленных (тугоплавких) минералов. При температуре расплава, поступающего из канала к кровле плюма, равной $T_p = 1410^\circ\text{C}$, в виде твердых взвесей в расплаве головы плюма остаются минералы: диопсид (Di) – 8,88 %, гиперстен (Hyp) – 15,21 %, магнетит (Mgt) – 3,48 %, ильменит (Ilm) – 1,33 %, апатит (Ap) – 0,46 % (стлб. 2 таблицы). Их суммарное весовое содержание 29,36 %. Плотность этих минералов ($\rho_{\text{Hyp}} = 3,3...3,5 \text{ г/см}^3$; $\rho_{\text{Di}} = 3,27...3,38 \text{ г/см}^3$; $\rho_{\text{Mgt}} = 4,8...5,3 \text{ г/см}^3$; $\rho_{\text{Ilm}} = 4,6...4,8 \text{ г/см}^3$; $\rho_{\text{Ap}} = 3,1...3,2 \text{ г/см}^3$) [1] больше плотности расплава, содержащего ортоклазовый Or ($\rho_{\text{Or}} = 2,56 \text{ г/см}^3$) и плагиоклазовый Pl ($\rho_{\text{Pl}} \approx 2,7 \text{ г/см}^3$) компоненты.

Большую долю тугоплавких минералов составляют нормативные пироксены (диопсид и гиперстен), в среднем плотность осажденных минералов больше плотности расплава примерно на 25 %. Поэтому произойдет осаждение более плотных кристаллов указанных тугоплавких минералов на подошву головы плюма (рис. 1). Также в виде твердой фазы в расплаве остается нормативный кварц Qtz (SiO_2) = 13,57 % (стлб. 2). При температуре расплава в голове плюма $T_p = 1410^\circ\text{C}$, SiO_2 может существовать в виде тридимита [8], плотность которого ($\rho_{\text{Tr}} = 2,22...2,26 \text{ г/см}^3$) [12] меньше плотности расплава. Поэтому тридимит будет всплывать к кровле плюма и находиться во взвешенном состоянии в свободноконвективных течениях головы плюма.

Далее определяется процентное содержание оксидов, составляющих осажденные из расплава твердые взеси. Приведем пример определения процентного содержания оксидов в диопсиде (Di = 8,88 %). Химическая формула диопсида может быть представлена в виде оксидов: $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$. Их молекулярный вес: $M_{\text{ox}}(\text{CaO}) = 56,08$, $M_{\text{ox}}(\text{MgO}) = 40,31$, $M_{\text{ox}}(2\text{SiO}_2) = 120,17$.

Молекулярный вес диопсида $M_{\text{Di}} = 216,56$. Находим процентное содержание каждого оксида в виде $(M_{\text{ox}}/M_{\text{Di}}) \times 8,88 \%$: $\text{CaO} - 2,30 \%$, $\text{MgO} - 1,65 \%$, $\text{SiO}_2 - 4,88 \%$. Аналогично определяется содержание оксидов для гиперстена (Hyp = 15,21 %). Для него имеем формулу $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$ (Fe = 50 %), и в оксидной форме $\text{MgO} \cdot \text{FeO} \cdot 2\text{SiO}_2$. Таким же образом определяется содержание оксидов в Ilm ($\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$, 1,33 %): FeO (0,63 %), TiO_2 (0,70 %) и Mgt ($\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, 3,48 %): FeO (1,08 %), Fe_2O_3 (2,40 %). Исходя из указанных расчетов, суммарное содержание для каждого оксида будет: $\text{SiO}_2 - 12,09 \%$, FeO – 6,41 %, $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 2,40 \%$, $\text{CaO} - 2,30 \%$, $\text{MgO} - 4,30 \%$, $\text{TiO}_2 - 0,70 \%$.

В сумме осажденные минералы (Di, Hyp, Mgt, Ilm, Ap) составляют 29,36 % (стлб. 2 таблицы). Для расплава, с учетом тугоплавких минералов, пересчет на нормативный состав дает Or (12,41 %), Ab (21,15 %), An (23,11 %) и Qtz (13,57 %) (стлб. 2). В межкристаллическом пространстве слоя, слагаемого осажденными тугоплавкими минералами, остается расплав, объем которого составляет ~26 % от объема осажденных твердых тугоплавких частиц (в приближении сферической упаковки) [3]. Для определения массового содержания расплава в межкристаллических пространствах осажденного слоя принимаем, что в первом приближении объем осажденного слоя составляет 29,36 % от объема головы плюма. Массовое процентное содержание расплава в межкристаллическом пространстве осажденного слоя составит $0,26 \times 29,36 = 7,63 \%$. Тогда для расплава, находящегося в межкристаллических пространствах осажденного слоя, для каждого компонента получаем:

$$\begin{aligned} \text{Qtz} (\text{SiO}_2) &= 0,076 \times 13,57 \% = 1,03 \%, \\ \text{Or} (\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2) &= \\ &= 0,076 \times 12,41 \% = \\ &= 0,95 \%, \text{ Ab} (\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2) = \\ &= 0,076 \times 21,15 \% = 1,61 \%, \\ \text{An} (\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2) &= \\ &= 0,076 \times 23,11 \% = 1,79 \%. \end{aligned}$$

Определим процентное содержание оксидов, оставшихся в межкристалличе-

ских пространствах осажденного слоя, способом, аналогичным приведенному. Суммарное процентное содержание оксидов, оставшихся в межкристаллических пространствах осажденного слоя: $\text{SiO}_2 - 3,34 \%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 - 1,14 \%$, $\text{CaO} - 0,36 \%$, $\text{Na}_2\text{O} - 0,19 \%$, $\text{K}_2\text{O} - 0,19 \%$. Суммарное значение процентного содержания каждого оксида для осажденных минералов и для расплава в межкристаллических пространствах:

$\text{SiO}_2 - 15,43 \%$, $\text{TiO}_2 - 0,70 \%$,
 $\text{Al}_2\text{O}_3 - 1,14 \%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 2,40 \%$,
 $\text{FeO} - 6,40 \%$, $\text{MgO} - 4,30 \%$,
 $\text{CaO} - 2,66 \%$, $\text{Na}_2\text{O} - 0,19 \%$,
 $\text{K}_2\text{O} - 0,19 \%$, $\text{P}_2\text{O}_5 - 0,20 \%$.

Тогда в пересчете на оксиды процентное содержание твердых взвесей и расплава, захваченного в межкристаллических пространствах, составляет $33,61 \%$, и поэтому толщина слоя расплава, залегающего над осажденным слоем в голове плюма толщиной l (рис. 1), будет $l_p = l(1 - 0,336) = 0,664l$. В первом приближении толщина слоя l соизмерима с диаметром канала плюма. Для $l = 29...33$ км, $l_p = (19,3...21,9)$ км. Оценки времени осаждения частиц тугоплавких минералов $t_{oc,m}$ на основе формулы Стокса для скорости движения шара U_{uu} дают $t_{oc,m} = (l - l_p)/2U_{uu} = 10...1614$ лет ($\ll t_{инт}$) для радиуса частиц $r = (0,25...1) \cdot 10^{-3}$ м, динамической вязкости $\eta = 10^2...10^3$ Па · с [9], разности плотностей частиц осаждающихся минералов и расплава $\Delta\rho = 700$ кг/м³.

Вычитая процентный состав соответствующего осажденного оксида (с учетом расплава в межкристаллических пространствах) из среднего состава континентальной коры (стлб. 2, верхний ярус таблицы), получаем состав расплава (в форме оксидов) в голове плюма после осаждения тугоплавких минералов (стлб. 3, верхний ярус). Например, содержание SiO_2 в расплаве составляет $59,30 \%$ – $15,43 \%$ = $43,87 \%$. Аналогично получаем процентное содержание других оксидов.

Перейдем от процентного содержания оксидов в слое расплава относительно содержания оксидов во всей голове плюма

толщиной l к процентному содержанию оксидов в слое расплава толщиной l_p . Чтобы определить процентное содержание оксидов для слоя расплава толщиной l_p , в таблице суммируем стлб. 3 ($\Sigma = 67,19 \%$) и затем умножаем его данные на величину $100/67,19$. Состав слоя расплава (в форме оксидов) представлен в таблице (стлб. 4, верхний ярус). Соответствующий нормативный состав представлен в стлб. 4 (нижний ярус): Or ($16,78 \%$), Ab ($29,11 \%$) и An ($32,38 \%$). Большую долю составляет плагиоклазовый компонент ($61,49 \%$). Нормативный кварц Qtz ($18,72 \%$) находится в расплаве в основном в виде твердой взвеси.

Определим состав расплава, остающегося после осаждения твердых взвесей плагиоклаза. Количество плагиоклазового компонента в расплаве, возникшем после осаждения тугоплавких минералов, будем определять по диаграмме плавления плагиоклаза для системы альбит-анортит $\text{Ab}_1\text{-An}_1$, где $\text{Ab}_1 = \text{Ab}/(\text{Ab} + \text{An})$, $\text{An}_1 = \text{An}/(\text{Ab} + \text{An})$, Ab и An – процентное содержание альбита и анортита в проплавляемом коровом слое (рис. 2).

То есть, в первом приближении, предположим, что закономерности поведения системы $\text{Ab}_1\text{-An}_1$ для расплава после осаждения тугоплавких минералов такие же, как для системы Ab-An. Для давления, равного 1 бар, диаграмма плавкости системы Ab-An представлена согласно N. L. Bowen [6]. Для давлений, больших 1 бар, диаграмма построена следующим образом: зная температуры плавления альбита и анортита при соответствующих давлениях, переносим линии солидуса и ликвидуса, соответствующие давлению, равному 1 бар.

В поле силы тяжести закристаллизовавшийся плагиоклаз находится в расплаве в гидродинамически неустойчивом состоянии из-за различия в плотности расплава и закристаллизовавшегося плагиоклаза. Например, с учетом плотности альбита ($2,6$ г / см³) и анортита ($2,75$ г/см³) [1] для плагиоклаза N 30 (рис. 2, состав на линии ликвидуса) $\rho_1 = 2,65$ г/см³, а для плагиоклаза N 70 (рис. 2, состав на линии

солидуса) $\rho_2 = 2,71 \text{ г/см}^3$, и разность плотностей $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1 = 0,06 \text{ г/см}^3$, т.е. различие в плотности составляет 2,2 %.

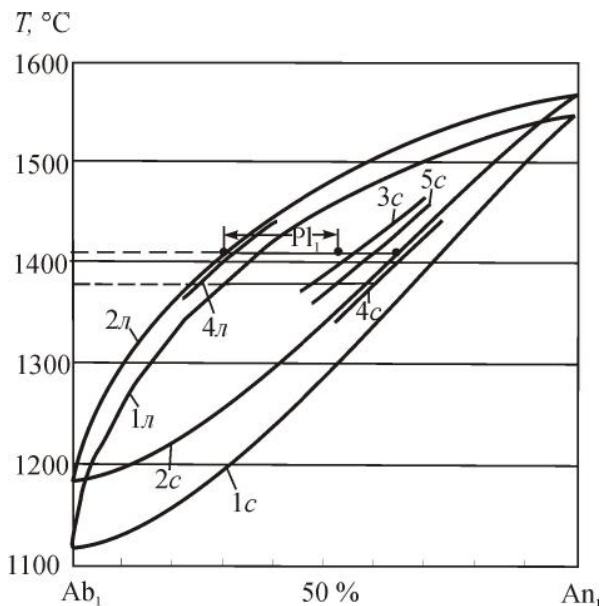


Рис. 2. Фазовая диаграмма плагиоклазов при различных давлениях. 1с – солидус при $P=1 \text{ бар}$; 1л – ликвидус при $P=1 \text{ бар}$ [6]; 2с – солидус при $P=6,3 \text{ кбар}$; 2л – ликвидус при $P=6,3 \text{ кбар}$; 3с – солидус при $P=12 \text{ кбар}$; 4с – солидус при $P=5 \text{ кбар}$; 4л – ликвидус при $P=5 \text{ кбар}$; 5с – солидус при $P=10 \text{ кбар}$ /

Fig. 2. Phase diagram of plagioclase feldspars for different pressures. 1с – solidus at $P=1 \text{ bar}$; 1л – liquidus at $P=1 \text{ bar}$ [6]; 2с – solidus at $P=6,3 \text{ kbar}$; 2л – liquidus at $P=6,3 \text{ kbar}$; 3с – solidus at $P=12 \text{ kbar}$; 4с – solidus at $P=5 \text{ kbar}$; 4л – liquidus at $P=5 \text{ kbar}$; 5с – solidus at $P=10 \text{ kbar}$

Рассмотрим этап осаждения плагиоклаза. На процессе осаждения твердых взвесей сказывается влияние гидродинамики и теплообмена, а также изменение с глубиной литостатического давления, которое проявляется через изменение диаграммы плавкости плагиоклазов. В расплаве головы плюма существуют горизонтальные течения вдоль кровли и подошвы слоя расплава в режиме ламинарной свободной конвекции. Происходит осаждение твердых частиц в условиях этих горизонтальных течений.

После осаждения тугоплавких фаз в расплаве головы плюма содержится $\text{Ab} = 29,11 \%$ и $\text{An} = 32,38 \%$ (стлб. 4 таблицы) и соответственно $\text{Ab}_1 = 47,3 \%$ и

$\text{An}_1 = 52,7 \%$. Анализ диаграммы плавкости для условий по давлению на кровле и подошвы головы плюма (рис. 2) показывает, что при увеличении глубины (давления) доля закристаллизовавшегося плагиоклаза Pl_1 возрастает. 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 определено при следующих условиях в окрестности подошвы головы плюма: $P_p = 6,3 \text{ кбар}$ и $T_p = 1410^\circ\text{C}$. Давление $P_p = 6,3 \text{ кбар}$ принято как среднее значение между давлением на подошве слоя расплава после осаждения тугоплавких минералов и давлением на подошве слоя расплава после осаждения плагиоклаза.

При $P_p = 6,3 \text{ кбар}$ доля закристаллизовавшегося плагиоклаза $\text{Pl}_{1\text{крист}} = 0,65$, а доля расплава – 0,35 (рис. 2). Состав закристаллизовавшегося плагиоклаза отвечает N 65, состав расплава отвечает N 30. Процентный состав закристаллизовавшегося $\text{Pl}_{1\text{крист}}$, отвечающего N 65:

$$\begin{aligned} \text{Ab}_{\text{крист}} &= \text{Ab}_{1\text{крист}} (\text{Ab} + \text{An}) \text{Pl}_{1\text{крист}} = \\ &= 35 \% \times 0,615 \times 0,65 = \\ &= 14 \%; \quad \text{An}_{\text{крист}} = \text{An}_{1\text{крист}} (\text{Ab} + \text{An}) \text{Pl}_{1\text{крист}} = \\ &= 65 \% \times 0,615 \times 0,65 = 26 \%. \end{aligned}$$

Далее, используя схему расчетов, приведенную для осажденных тугоплавких минералов, определяем процентный состав оксидов в закристаллизовавшемся плагиоклазе.

$$\begin{aligned} \text{Pl}_{1\text{крист}} (\text{Ab}_{\text{крист}} + \text{An}_{\text{крист}}) &= \\ &= 0,65 \times 61,5 \% = 40 \% \end{aligned}$$

остается расплав в межкристаллических пространствах: $0,26 \times 40 \% = 10,4 \%$.

В пересчете на нормативный состав расплав представлен смесью следующих компонентов: $\text{Qtz} = 18,72 \%$, $\text{Or} = 16,78 \%$, $\text{Ab} = [\text{Ab}_{1\text{р}} (\text{Ab} + \text{An}) (1 - \text{Pl}_{1\text{крист}})] = 15,07 \%$, $\text{An} = [\text{An}_{1\text{р}} (\text{Ab} + \text{An}) (1 - \text{Pl}_{1\text{крист}})] = 6,46 \%$.

Расплав, который остается вместе с осажденным плагиоклазом, содержит:

$$\begin{aligned} \text{Qtz} &= 0,104 \times 18,72 = 1,95 \%, \\ \text{Or} &= 0,104 \times 16,78 = 1,75 \%, \end{aligned}$$

$$Ab - 0,104 \times 15,07 = 1,57 \%,$$

$$An - 0,104 \times 6,46 = 0,67 \%.$$

Определим процентное содержание оксидов для расплава, оставшегося в межкристаллических пространствах осажженного плагиоклаза способом, аналогичным представленному. Суммарное значение процентного содержания для каждого оксида для осажденных минералов и расплава в межкристаллических пространствах:

$$SiO_2 - 23,35 \%, Al_2O_3 - 13,07 \%,$$

$$Na_2O - 1,84 \%, CaO - 5,39 \%,$$

$$K_2O - 0,3 \%.$$

Доля осажденных минералов и расплава в межкристаллическом пространстве составляет 0,44 и толщина l'_p слоя расплава, оставшегося после осаждения твердых взвесей плагиоклаза (рис. 1), $l'_p = (1 - 0,44)l_p = 0,56l_p$. Для полученных значений $l_p = 19,3...21,9$ км, $l'_p = 10,8...12,3$ км. Время осаждения частиц плагиоклаза в расплаве головы плюма $t_{oc,Pl} = (l_p - l'_p)/2U = 26 - 412$ лет ($\ll t_{инт}$) для $r = (0,5...2) \cdot 10^{-3}$ м, $\eta = 10^2$ Па · с [9], $\Delta\rho = 60$ кг/м³.

Определим процентное содержание оксидов в расплаве головы плюма толщиной l'_p , получившееся после осаждения плагиоклаза (рис. 1). Суммировав стлб. 5 таблицы ($\Sigma = 55,11 \%$) и умножив его на величину $100/55,11$, получим процентное содержание оксидов в остаточном расплаве, представленное в стлб. 6. Как следует из стлб. 6, содержание $SiO_2 - 76,1 \%$. Содержание SiO_2 в нормальных гранитах — 70...73 % [4]. Нормативный состав для расплава представлен в стлб. 6, в нижнем ярусе таблицы. Нормативное содержание $Ab = 24,54 \%$, $An = 10,67 \%$. Тогда относительное содержание $Ab_1 - 70 \%$, $An_1 - 30 \%$, такое содержание Ab_1 и An_1 находится в области ликвидуса системы Ab_1-An_1 (рис. 2).

Для температуры расплава в голове плюма $T_p = 1380$ °С расчеты состава (приведенные в таблице) и определение толщины слоя расплава проводятся по способу, описанному для случая $T_p = 1410$ °С. Для $T_p = 1380$ °С, согласно диаграмме плавкости плагиоклазов, глубина проплавления коры (глубина залегания подошвы головы

плюма) $l_{кор} = 28$ км ($P = 9,3$ кбар). Для толщины массива над кровлей головы плюма $\delta = 5$ км (рис. 1), толщина слоя расплава грибообразной головы $l = l_{кор} - \delta = 23$ км. Толщина слоя расплава после осаждения частиц тугоплавких минералов

$$l_p = l(1 - 0,34) = 0,66l = 15,2 \text{ км.}$$

Толщина слоя остаточного расплава

$$l'_p = l_p(1 - 0,52) = 0,48l_p, \text{ и для } l_p = 15,2 \text{ км, } l'_p = 7,3 \text{ км.}$$

Расчеты нормативного состава для нормальных гранитов, исходя из данных [4], дают: Qtz = 28...35 %, Or = 27...36 %, Ab = 23...26 %, An = 1...6 %, что удовлетворительно согласуется с данными наших расчетов для компонентов расплава (стлб. 6, 8 таблицы). Таким образом, на основе предложенной модели плюма с грибообразной головой в результате расчетов удалось получить нормативный состав, близкий к составу нормальных гранитов (в отношении Qtz, Or, Ab и An).

Выводы. На основе данных лабораторного моделирования представлена структура течения в расплаве грибообразной головы мантийного термохимического плюма. Крупномасштабные горизонтальные течения у подошвы головы плюма могут способствовать процессам кристаллизационной дифференциации расплава.

В результате расчетов на основе модели тепловой и гидродинамической структуры плюма с грибообразной головой для расплава головы плюма получен нормативный состав, близкий к составу нормальных гранитов. При уменьшении температуры расплава от 1410 до 1380 °С толщина слоя остаточного расплава l'_p уменьшается от 10,8 до 7,3 км. Вследствие процессов кристаллизационной дифференциации, протекающих в расплаве головы плюма, она имеет трехслойную структуру: нижний слой сложен осажденными тугоплавкими минералами, средний — осажденным плагиоклазом, верхний — представляет собой остаточный расплав, состав которого (в отношении Qtz, Or, Ab и An) близок к гранитному.

Список литературы

1. Вертушков Г. Н., Авдонин В. Н. Таблицы для определения минералов по физическим и химическим свойствам: справочник. М.: Недра, 1992. 489 с.
2. Войткевич Г. В., Кокин А. В., Мирошников А. Е., Прохоров В. Г. Справочник по геохимии. М.: Недра, 1990. 480 с.
3. Некрасов Б. В. Основы общей химии: в 2 т. Т. 1. М.: Химия, 1973. 656 с.
4. Саранчина Г. М., Шинкарев Н. Ф. Петрография магматических и метаморфических пород. Л.: Недра, 1967. 324 с.
5. Ballmer M. D., Ito G., Wolfe C.J., Solomon S.C. Double layering of a thermochemical plume in the upper mantle beneath Hawaii // *Earth and Planetary Science Letters*. 2013. Vol. 376. P. 155–164.
6. Bowen N. L. The melting phenomena of the plagioclase feldspars // *American Journal of Science*. 1913. Vol. 35. No. 210. P. 577–599.
7. Brown M. Granite: from genesis to emplacement // *Geological Society of America Bulletin*. 2013. Vol. 125. No. 7/8. P. 1079–1113.
8. Brückner R. Silicon dioxide // *Encyclopedia of Applied Physics*. 2003. P. 101–131.
9. Cranmer D., Uhlmann D. R. Viscosities in the system albite-anorthite // *Journal of Geophysical Research*. 1981. Vol. 86. P. 7951–7956.
10. Dobretsov N. L., Kirdyashkin A. A., Kirdyashkin A. G., Vernikovskiy V. A., Gladkov I. N. Modelling of thermochemical plumes and implications for the origin of the Siberian traps // *Lithos*. 2008. Vol. 100. P. 66–92.
11. 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.
12. Pabst W., Gregorová E. Elastic properties of silica polymorphs – a review // *Ceramics – Silikáty*. 2013. Vol. 57. No. 3. P. 167–184.
13. Schubert G., Turcotte D. L., Olson P. *Mantle convection in the Earth and planets*. Cambridge University Press, 2001. 940 p.
14. Yang T., Fu R. Thermochemical piles in the lowermost mantle and their evolution // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2014. Vol. 236. P. 109–116.

References

1. Vertushkov G. N., Avdonin V. N. *Tablitsy dlya opredeleniya mineralov po fizicheskim i himicheskim svoystvam* (Tables for the determination of minerals by their physical and chemical properties: reference book). Moscow: Nedra, 1992. 489 p.
2. Voytkевич G. V., Kokin A. V., Miroshnikov A. E., Prokhorov V. G. *Handbook of Geochemistry* (Handbook of Geochemistry). Moscow: Nedra, 1990. 480 p.
3. Nekrasov B. N. *Osnovy obshchey himii: v 2 t. T. 1* (Fundamentals of general chemistry: in 2 volumes. Vol. 1). Moscow: Khimiya, 1973. 656 p.
4. Saranchina G. M., Shinkarev N. F. *Petrografiya magmaticheskikh i metamorficheskikh porod* (Petrography of magmatic and metamorphic rocks). Leningrad.: Nedra, 1967. 324 p.
5. Ballmer M. D., Ito G., Wolfe C. J., Solomon S. C. *Earth and Planetary Science Letters* (Earth and Planetary Science Letters), 2013, vol. 376, pp. 155–164.
6. Bowen N. L. *American Journal of Science* (American Journal of Science), 1913, vol. 35, no. 210, pp. 577–599.
7. Brown M. *Geological Society of America Bulletin* (Geological Society of America Bulletin), 2013, vol. 125, no. 7/8, pp. 1079–1113.
8. Brückner R. *Encyclopedia of Applied Physics* (Encyclopedia of Applied Physics), 2003, pp. 101–113.
9. Cranmer D., Uhlmann D. R. *Journal of Geophysical Research* (Journal of Geophysical Research), 1981, vol. 86, pp. 7951–7956.
10. Dobretsov N. L., Kirdyashkin A. A., Kirdyashkin A. G., Vernikovskiy V. A., Gladkov I. N. *Lithos* (Lithos), 2008, vol. 100, pp. 66–92.
11. Kirdyashkin A. A., Kirdyashkin A. G., Gurov V. V. *Geotectonics* (Geotectonics), 2017, vol. 51, no. 4, pp. 398–411.
12. Pabst W., Gregorová E. *Ceramics – Silikáty* (Ceramics – Silikáty), 2013, vol. 57, no. 3, pp. 167–184.
13. Schubert G., Turcotte D. L., Olson P. *Mantle convection in the Earth and planets* (Mantle convection in the Earth and planets). Cambridge University Press, 2001. 940 p.
14. Yang T., Fu R. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* (Physics of the Earth and Planetary Interiors), 2014, vol. 236, pp. 109–116.

Коротко об авторах

Кирдяшкин Анатолий Григорьевич, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физического и химического моделирования геологических процессов, Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, 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.-минерал. наук, профессор Российской академии наук, зав. лабораторией физического и химического моделирования геологических процессов, Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, доцент кафедры минералогии и петрографии, Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия. Область научных интересов: лабораторное и теоретическое моделирование геодинамических процессов, тектонофизика, геотектоника
aak@igm.nsc.ru

Гладков Игорь Николаевич, научный сотрудник лаборатории физического и химического моделирования геологических процессов, Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Россия. Область научных интересов: геодинамика, лабораторное моделирование мантийных плюмов
kir@igm.nsc.ru

Дистанов Валерий Элимирович, канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник лаборатории физического и химического моделирования геологических процессов, Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Россия. Область научных интересов: геодинамика, конвективный теплообмен, физическое моделирование, рост кристаллов
dist@igm.nsc.ru

Briefly about the authors

Anatoly Kirdyashkin, doctor of technical sciences, leading researcher, Laboratory of Physical and Chemical Modeling of Geological Processes, 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

Alexey Kirdyashkin, doctor of geology and mineralogy sciences, professor of the Russian Academy of Sciences, chief of the Laboratory of Physical and Chemical Modeling of Geological Processes, V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, associate professor, Mineralogy and Petrography department, Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia. Sphere of scientific interests: laboratory and theoretical modeling of geodynamic processes, tectonophysics, geotectonics

Igor Gladkov, researcher, Laboratory of Physical and Chemical Modelling of Geological Processes, V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia. Sphere of scientific interests: geodynamics, laboratory modeling of mantle plumes.

Valery Distanov, senior researcher, Laboratory of Physical and Chemical Modelling of Geological Processes, V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia. Sphere of scientific interests: geodynamics, convective heat transfer, physical modeling, crystal growth

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

Образец цитирования

Кирдяшкин А. Г., Кирдяшкин А. А., Гладков И. Н., Дистанов В. Е. Тепло- и массообмен и кристаллизация в грибообразной голове термохимического плюма // Вестн. Забайкал. гос. ун-та. 2018. Т. 24. № 2. С. 4–13. DOI: 10.21209/2227-9245-2018-24-2-4-13.

Kirlyashkin A., Kirlyashkin A., Gladkov I., Distan V. Heat and mass transfer and crystallization in the mushroom head of a thermochemical plume // Transbaikal State University Journal, 2018, vol. 24, no. 2, pp. 4–13. DOI: 10.21209/2227-9245-2018-24-2-4-13.

Статья поступила в редакцию: 30.01.2018 г.
Статья принята к публикации: 05.02.2018 г.