

Распределение редких элементов на разных этапах эволюции рифейских и фанерозойских толеит-базальтовых расплавов на востоке Сибирской платформы

А.Г. Копылова

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия
Kopylova@diamond.ysn.ru

Аннотация. Базитовый магматизм в восточной части Сибирской платформы проявлялся неоднократно в течение длительного времени в разных геодинамических обстановках. В позднедокембрийское и среднепалеозойское время он связан с процессами рифтогенеза, а в позднепалеозойское–раннемезозойское – с заложением и развитием трапповых синеклиз. Специфика геодинамического режима магмообразования зафиксирована в вещественном составе пород. В данном сообщении выполнено обобщающее исследование петрогеохимических особенностей производных толеит-базальтовых расплавов, формирующихся в разных геодинамических обстановках. Состав инициальных магм существенно менялся на различных этапах развития магматической системы. На основе многокомпонентного анализа рассмотрено влияние процессов фракционирования базитового расплава на изменение геохимических особенностей пород, происходивших в различных РТ-условиях. При внутрикамерной дифференциации расплава в последовательном ряду пород от основных магнезиальных к кислым щелочным происходит активное изменение состава. В образующейся серии пород уменьшается содержание редких элементов, входящих в решетку ранних феррических фаз, и накопление практически всех расплавофильных компонентов. Эволюция расплавов нормальной щелочности происходит с ростом суммы REE, при незначительном их разделении. Особое место занимают интрузивы, прошедшие стадию высокобарического фракционирования в глубинном промежуточном очаге. Следствием такой дифференциации служит появление в разрезе тел своеобразной группы пород – в одном случае монзонит-порфиров, в другом анортозитовых габбро-долеритов. Установлено, что монцоитовидный тип дифференциации идет с накоплением LREE, LILE и элементов циркониевой группы Nb, Ta, Hf и Y. Признаком анортозитовой тенденции дифференциации магматического расплава является обособление анортозитовых габбро-долеритов в разрезе тел, рост содержания в них алюминия, кальция, стронция.

Ключевые слова: восточная часть Сибирской платформы, базиты, монзониты, анортозиты, микроэлементный состав.

Благодарности. Работа выполнена по плану НИР ИГАБМ СО РАН (проект 0381-2019-0003) и при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-45-140043 р_а. Автор выражает благодарность А.В. Округину за высказанные конструктивные замечания, которые были учтены при доработке статьи.

Введение

Базитовый магматизм в восточной части Сибирской платформы проявлялся неоднократно в течение длительного времени в разных геодинамических обстановках [1–3]. В позднедокембрийское и среднепалеозойское время он связан с процессами рифтогенеза, а в позднепалеозойско–раннемезозойское – с заложением и развитием трапповых синеклиз. В докембрии и среднем палеозое формируются протяженные дайко-

вые пояса. Трапповая формация представлена мощными межпластовыми силловыми интрузиями, занимающими большие площади и в различной степени дифференцированными. Различие геодинамического режима магмообразования зафиксировано в вещественном составе пород разных формаций [4, 5]. В данной работе рассматривается влияние процессов фракционирования на изменение геохимических особенностей исходного состава базитов.

Фактический материал и методы исследований

В основу работы положены результаты химических и микроэлементных характеристик разновозрастных базитов восточной части Сибирской платформы из коллекции образцов, собранных сотрудниками лаборатории «Геологический музей» ИГАБМ СО РАН. Определение породообразующих элементов проведено классическим методом силикатного анализа в ОФХМА ИГАБМ СО РАН, редкие элементы анализировались методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) в ИМГРЭ (аналитик Д.З. Журавлев) на приборе Elan 6100 DRC (ELAN 6100 DRC, Software Kit, May 2000, PerkinElmer SCIEX instrument) в стандартном режиме. Калибровку чувствительности прибора по всей шкале масс осуществляли с помощью стандартных растворов, включающих все анализируемые в пробах элементы. В статье использовано 730 определений породообразующих элементов и 80 многокомпонентных анализов микроэлементов как типичных представителей базитов, так и базитов сложных интрузивов. Структурные особенности пород изучались в прозрачных шлифах под поляризационным микроскопом Leica DMLSP.

Петрогеохимические характеристики базитов

В предопределении исходного состава родоначальных магм решающую роль играет геодинамическая обстановка. В табл. 1 приведены средние значения химического и микроэлементного состава базитов, сформировавшихся в разное геологическое время и в разных геодинамических структурах в пределах восточной части Сибирской платформы. Расчет средних проводился с использованием данных по интрузивам без существенных признаков фракционирования сформировавшихся их расплавов. Производные траппового магматизма пермо-триасового возраста представлены в основном телами толеит-базальтового состава с нормальным уровнем щелочности, с содержанием $1,0\text{--}1,7 \text{ TiO}_2$, $0,5\text{--}0,7 \text{ K}_2\text{O}$, $0,12\text{--}0,20 \text{ P}_2\text{O}_5$, умеренным содержанием когерентных и расплавофильных элементов. Для производных рифтогенного магматизма докембрия и девона характерны повышенные содержания Ti, P, K и всех несовместимых элементов. Это средние данные и существенные отклонения от них зависят от многих факторов – от глубины зарождения родоначальных магм, степени плав-

ления мантийного субстрата, наличия промежуточных камер, степени дифференциации начального магматического состава [6].

Существенно меняется состав родоначальных магм при процессах фракционно-кристаллизационной дифференциации. Она имеет место на различных этапах существования магматической системы. В достаточно мощных интрузивах трапповых синеклиз в ходе внутрикамерной кристаллизации магматического расплава формируется широкий спектр пород от магнезиальных основных до кислых щелочных. При этом происходит наиболее заметное изменение содержания породообразующих и редких элементов. Пермо-триасовый Нижне-Томбинский интрузив типичный представитель расслоенных трапповых массивов [6]. Он входит в состав Нижне-Томбинского траппового комплекса, включающего тела трех разных петрохимических типов, и относится к первому типу [8, 9]. Интрузия дифференцирована от нижних горизонтов троктолитовых габбро-долеритов до линзовидных шпиров габбро-пегматитов, гранофилов и ферро-габбро (рис. 1). Степень расслоенности достаточно высока – коэффициент магнезиальности изменяется от 48 до 33, достигая значений $\text{Mg\#} = 12\text{--}17$ в кислых разностях (см. табл. 1). Стратифицированный характер интрузии подчеркивается закономерным изменением содержания редких элементов. В последовательно образующейся серии пород уменьшается содержание микроэлементов, входящих в решетку ранних фаз, например, наиболее активно из расплава уходят Cr и Ni, максимальное содержание которых фиксируется в троктолитовых габбро-долеритах. На средних стадиях идет накопление V и Sc, входящих в решетку клинопироксена. В шлирах высококремнистых щелочных габбро-пегматитов и гранофилов содержание сидерофильных элементов становится минимальным. Максимальные содержания Cu и Zn установлены в ферро-габбро, в которых среди минералов шпиров присутствуют их сульфиды пирит и сфалерит. Для всех несовместимых элементов, кроме Sr, установлены минимальные значения в троктолитовых долеритах и самые максимальные в кислых дифференциатах. Из общего количества стронция в основных магматических породах 95 % связано в плагиоклазах и благодаря своей активности он накапливается в ранних основных плагиоклазах, замещая кальций [10]. Обогащение стронцием ранних плагиоклазов в троктолитовых габбро-

Таблица 1

Химический (мас %) и микроэлементный (г/т) состав базитов

Table 1

Chemical (wt. %) and microelement (g/t) composition of basites

Компонент	Средние составы базитов			Дифференциаты пермо-триасового Нижне-Томбинского интрузива				
	Пермо-триас n = 396	Девон n = 156	Рифей n = 155	Ол-72-13	Ол-75-9	Ол-71-8	Ол-72-19	Ол-72-16
1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	48,57	48,43	48,60	45,79	48,25	58,6	62,48	46,78
TiO ₂	1,48	2,78	2,58	1,29	1,46	1,60	1,12	2,13
Al ₂ O ₃	14,62	13,76	12,97	15,31	14,24	12,17	12,33	14,32
Fe ₂ O ₃	3,88	3,95	5,70	4,54	4,83	5,51	6,49	7,89
FeO	9,35	9,94	10,26	10,7	8,08	7,61	5,81	10,11
MnO	0,19	0,19	0,17	0,20	0,19	0,13	0,17	0,27
MgO	7,04	5,84	5,59	8,23	6,86	1,49	0,93	4,71
CaO	10,77	9,63	8,38	11,63	10,67	5,89	3,17	9,82
Na ₂ O	2,23	2,30	2,62	1,84	2,10	3,45	3,33	2,66
K ₂ O	0,64	1,30	1,08	0,54	0,50	2,26	3,16	0,87
P ₂ O ₅	0,19	0,36	0,26	0,15	0,16	0,47	0,21	0,27
Mg#	50	44	39	50	48	17	12	33
Rb	14,2	23,9	26,2	14	15,0	29	68	17
Ba	167	247	293	92	167	280	443	128
Th	1,41	2,42	2,41	0,77	2,30	3,9	5,9	1,5
U	0,53	0,72	0,51	0,22	0,51	2,2	2,7	0,80
Nb	7,01	27,1	14,8	3,1	4,35	14	6,3	18
Ta	0,46	1,91	0,94	0,16	0,34	0,88	0,31	1,1
Zr	118	216	186	58	93,4	301	542	135
Hf	2,98	5,36	4,49	1,0	2,67	7,4	3,2	13
Y	29,2	32,3	28,1	21	27,3	53	30	60
Sr	237	376	325	236	251	352	167	214
La	9,92	23,2	21,4	6,4	12,5	23	26	11
Ce	22,4	53,4	49,6	15	28,6	64	67	27
Pr	2,96	7,08	6,37	2,1	1,77	8,3	8,4	3,8
Nd	14,2	30,7	28,3	10	15,6	39	40	17
Sm	3,93	7,09	6,26	2,9	2,92	9,9	9,9	4,7
Eu	1,29	2,15	2,06	1,0	1,18	1,9	2,4	1,5
Gd	4,49	7,06	6,20	3,2	4,49	11	9,6	5,1
Tb	0,77	1,1	0,91	0,57	0,83	1,7	1,7	0,9
Dy	4,93	6,49	5,59	3,5	4,74	11	11	5,7
Ho	1,04	1,32	1,08	0,75	1,06	2,3	2,4	1,2
Er	2,97	3,45	3,09	2,3	3,17	6,6	6,9	3,6
Tm	0,54	0,5	0,40	0,30	0,42	0,93	1,0	0,49
Yb	2,74	3,11	2,56	1,9	2,85	6,0	7,4	3,1
Lu	0,41	0,45	0,35	0,29	0,45	0,89	1,2	0,49

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ni	137	96	98	130	87	19	14	29
Co	50	46	52	51	51,8	16	11	42
Cr	316	138	155	220	205	31	14	9
V	299	317	318	240	340	16	11	340
Cu	176	165	148	144	185	84	37	245
$\sum P3Э$	73	147	134	49,71	86,4	186,1	193,9	84,7
(La/Yb) _n	2,6	5,7	6,15	2,37	3,04	2,72	2,54	2,50
Eu/Eu*	0,94	0,92	0,92	1,05	0,99	0,57	0,76	0,92
Nb/Nb*	0,63	1,22	0,75	0,51	0,35	0,55	0,54	0,56
n	39	11	7					

Примечание. Дифференциаты Нижне-Томбинского интрузива: Ол-72-13 – троктолитовый габбро-долерит, Ол-75-9 – оливинсодержащий долерит, Ол-71-8 – габбро-пегматит, Ол-72-19 – гранофир, Ол-72-16 – ферро-габбро. $Mg\# = Mg^{2+} \cdot 100 / (Mg^{2+} + Fe_{общ}^{2+})$, $Eu/Eu^* = Eu_n / (Sm_n + Gd_n)^{1/2}$; $Nb/Nb^* = 0,3618 \times Nb / \sqrt{(La \cdot Th)}$; n – количество анализов.

Note. Differentiates of the Nizhne-Tomba intrusion: Ol-72-13 – troktolite gabbro-dolerite, Ol-75-9 – Olivine-containing dolerite, Ol-71-8 – gabbro-pegmatite, Ol-72-19 – granofir, Ol-72-16 – ferro-gabbro. $Mg\# = Mg^{2+} \times 100 / (Mg^{2+} + Fe_{sum}^{2+})$, $Eu/Eu^* = Eu_n / (Sm_n \times Gd_n)^{1/2}$; $Nb/Nb^* = 0.3618 \times Nb / \sqrt{(La \cdot Th)}$; n – number of analyses.

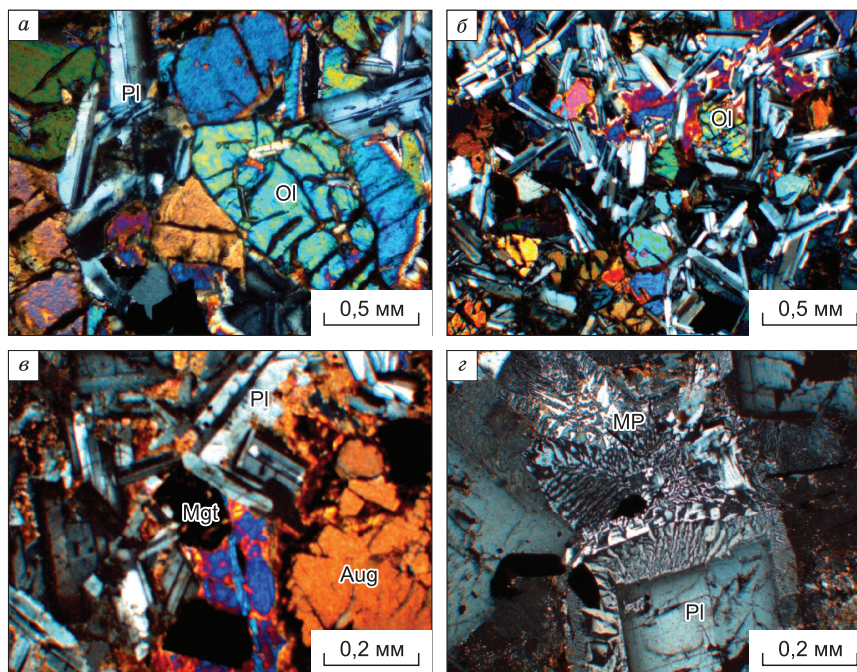


Рис. 1. Структуры пород Нижне-Томбинского дифференцированного интрузива:

a – идиоморфные кристаллы оливина (Ol) в троктолитовом габбро-долерите; *б* – скопление кристаллов оливина в оливинсодержащем габбро-долерите; *в* – кристаллы железистого авгита (Aug), зонального плагиоклаза (Pl) и скелетного магнетита (Mgt) в ферро-габбро; *з* – призмы плагиоклаза в микропегматитовом (MP) агрегате в габбро-пегматите.

Fig. 1. Rock structure of the Nizhne-Tomba differentiated intrusion:

a – idiomorphic olivine (Ol) crystal in troctolite gabbro-dolerite; *б* – accumulation of olivine crystals in olivine-bearing gabbro-dolerite; *в* – crystals of ferruginous augite (Aug), zoned plagioclase (Pl) and skeletal magnetite (Mgt) in ferro-gabbro; *з* – plagioclase prisms in micropegmatite (MP) aggregate in gabbro-pegmatite.

долеритах неизбежно приводит при кристаллизационной дифференциации к понижению его содержания в породах шпиров. На спайдер-диаграмме (рис. 2, *а*) фиксируются минимумы Sr и Eu в конечных продуктах дифференциации, что связано со снижающейся концентрацией кальция, а для Eu, возможно, и с окислительными условиями и отставанием Eu^{2+} от других более окисленных REE [11].

Эволюция расплавов нормальной щелочности во внутрикамерных условиях идет с преимущественным накоплением практически всех несовместимых элементов и всей суммы REE, при незначительном их разделении – отношение La/Yb_n изменяется в узких пределах от троктолитовых долеритов до кислых дифференциатов (2,37–2,72), при этом суммарное их значение увеличивается от 49,1 до 193,4. В линзах ферро-габбро в сложении пород участвуют плагиоклаз средней основности (An_{50-45}), ферроавгит (Fs_{39-45}), достаточно велика доля рудных минералов. Благодаря значительной доли рудных минералов ферро-габбро отличаются от обычных долеритов высоким содержанием железа (17,20 % FeO), титана (2,13 % TiO_2), относительно повышенными значениями высокозарядных элементов – Ti, Zr, Hf, Nb, V, геохимическая история которых в базитах связана с окиснорудными минералами и отчасти с клинопироксеном. Стронциевый минимум в ферро-габбро проявлен существенно слабее, чем в шпиргах габбро-пегматитов, а европиевый практически не обозначен. На мультиэлементной диаграмме (см. рис. 2, *а*) для всех дифференциатов Нижне-Томбинского интрузива четко фиксируется Ta–Nb-минимум, который типичен для траппов Сибирской платформы.

Девонская Нюрбинская дайка – пример проявления как внутрикамерной, так и докамерной дифференциации базитового расплава [12, 13]. Субщелочные офитовые породы краевых зон дайки сменяются кварцевыми габбро-долеритами, а центральная ее часть выполнена монцонит-порфирами второй фазы внедрения (рис. 3). Низкие значения $\text{Mg\#} = 36$, пониженные содержания Ni, Co, Cr и повышенные щелочей в породах краевых зон свидетельствуют о значительной степени дифференцированности расплава, поступившего в камеру (табл. 2). В гипобазисальных условиях происходило дальнейшее фракционирование его с образованием пород, все более обогащенных кремнием и калием [14]. Резкое

увеличение кремнекислотности и содержания калия при переходе от кварцевых габбро-долеритов к монцонит-порфирам невозможно объяснить только процессами внутрикамерной дифференциации. Это связано с процессом метаматматического преобразования субщелочного базальтового расплава при его задержке в промежуточном очаге (15–20 км от палеоповерхности, при давлении 5–8 кбар), который был обозначен как монцоитоидный тип дифференциации базальтового расплава [15, 16].

Повторное пульсационное раскрытие магмопроводника обусловило разрыв сплошности уже частично раскристаллизованной дайки. Монцоитоидный расплав в виде второй фазы внедрился в ее центральную часть, образуя четкие контакты с кварцевыми габбро-долеритами, что однозначно свидетельствует о двухактном поступлении расплава в камеру интрузива. Монцонит-порфиры – это пористые породы с обилием миндалинов. В их сложении участвуют андезин, калиевый полевой шпат, апатит, ильменит, амфибол-хлористый агрегат, роговая обманка, сфен, циркон. В монцонит-порфирах установлены максимальные содержания K_2O (до 5,6 %), Rb, Ba, Th, U, а также REE ($\Sigma = 619$), отношение $(\text{La/Yb})_n$ увеличивается до значений 10,6 (см. табл. 2). Характерной геохимической особенностью щелочных базитов является высокое содержание элементов циркониевой группы – Zr, Y, Yb, Ta и Nb (см. рис. 2, *б*). Эти элементы концентрируются в ильмените, но наиболее активно – в акцессорных апатите, цирконе, сфене. Содержание последних минералов больше всего в кварцевых габбро-долеритах и монцонит-порфирах, поэтому и доли этих элементов в них максимальные. Обогащенность монцонит-порфиров радиоактивными Th и U обусловлена их способностью накапливаться в остаточных расплавах и концентрироваться в поздних акцессорных минералах. В монцонитах торий и уран охотно входят в минералы титана и циркона. По сравнению с остальными дифференциатами дайки монцонит-порфиры имеют относительно пониженные содержания Sr и максимальную отрицательную аномалию европия ($\text{Eu/Eu}^* = 0,65$), что, скорее всего, определяется низкой кальциевостью плагиоклаза и появлением щелочных полевых шпатов в монцонит-порфирах. Европиевый минимум также отражает высокую степень фракционирования расплава на стадии его кристаллизации. Изначально низкие значения концентраций сидерофильных эле-

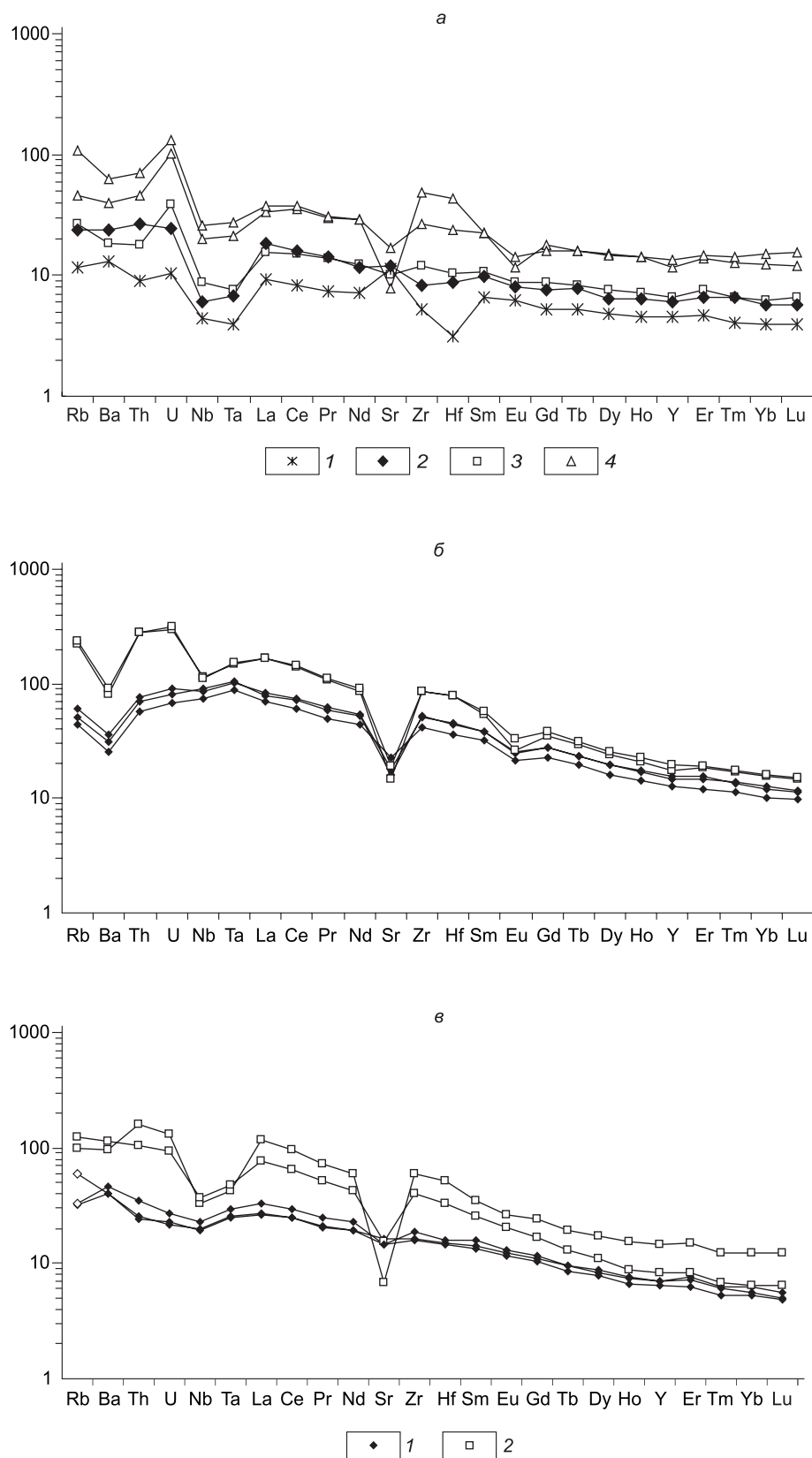


Рис. 2. (начало)

Fig. 2. (beginning)

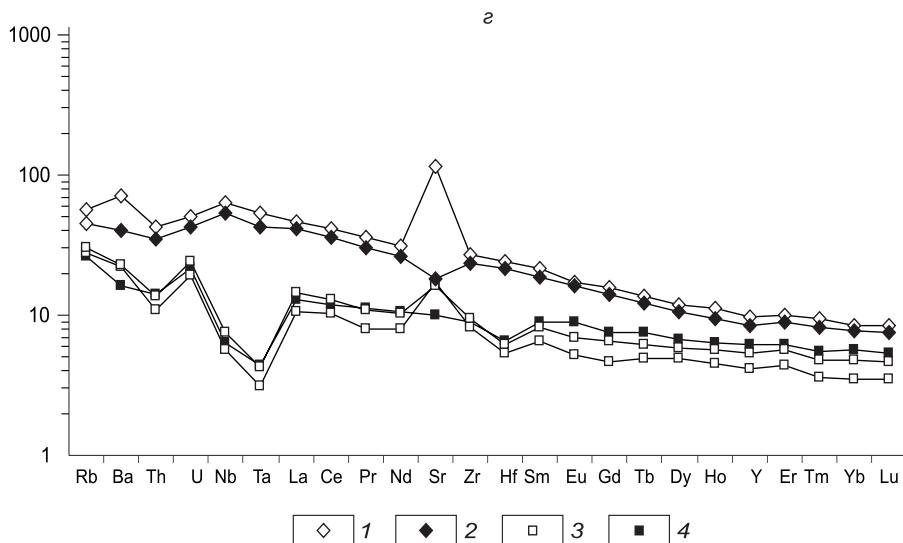


Рис. 2. (окончание) Распределение редких элементов в базитах восточной части Сибирской платформы. Нормировано по примитивной мантии [22].

a – пермо-триасовый Нижне-Томбинский дифференцированный интрузив (1 – троктолитовые долериты, 2 – оливиновые габбро-долериты, 3 – ферро-габбро, 4 – габбро-пегматиты); *б, в* – интрузивы с монцонитоидным типом дифференциации: среднепалеозойские базиты – Нюрбинская дайка (*б*), докембрийские базиты – Кенгединские дайки (*в*) (1 – долериты, 2 – монцонит-порфиры); *г* – интрузивы с анортозитовым типом дифференциации (1 – анортозитовые габбро-долериты, 2 – оливинсодержащие долериты среднепалеозойского Усть-Ханнинского интрузива, 3 – анортозитовые габбро-долериты, 4 – оливинсодержащие долериты пермо-триасового Биллэхского интрузива).

Fig. 2. (ending) Distribution of rare elements in basic rocks of the eastern part of the Siberian platform. Normalized to the primitive mantle [22].

a – Permian-Triassic Nizhne-Tomba differentiated intrusion (1 – troctolite dolerites, 2 – olivine gabbro-dolerites, 3 – ferro-gabbros, 4 – gabbro-pegmatites); *б, в* – intrusions with monzonitoid-type differentiation: Middle Paleozoic basites – Nyurba dyke (*б*), Precambrian basites – Kengede dykes (*в*) (1 – dolerites, 2 – monzonite-porphyrines); *г* – intrusions with anorthosite-type differentiation: Middle Paleozoic basites – Ust-Khanniya intrusion (1 – anorthosite gabbro-dolerites, 2 – olivine-bearing dolerites; Permian-Triassic traps – Billekh intrusion, 3 – anorthosite gabbro-dolerites, 4 – olivine-bearing dolerites).

ментов Ni, Co, Cr в щелочных базитах дайки в ходе внутрикамерной дифференциации продолжают снижаться, достигая минимума в кварцевых габбро-долеритах и монцонит-порфирах.

На Анабарском массиве широко развиты протяженные дайковые пояса докембрийских (рифейских) базитов [17], среди которых распространены сложные дайки, представленные дифференциатами толеит-базальтового и, реже, субщелочного состава с признаками монцонитоидного типа дифференциации [18]. Основная часть разреза многократных даек выполнена кварцевыми габбро-долеритами, а центральная – монцонит-порфирами. Наличие четких контактов между габброидами и монцонитами однозначно свидетельствует о неоднократном поступлении магмы [15]. Докембрийские дайки отличаются от рифтогенных интрузивов девона более низкими содержаниями калия, фосфора и в сумме щелочей в монцонит-порфирах основная роль принадлежит натрию (см. табл. 2). Но характер распределения

большинства редких элементов остается таким же, как и для среднепалеозойских базитов. Об этом свидетельствует идентичность их спайдер-диаграмм (см. рис. 2 *б, в*). Исключение составляет наличие Ta-Nb-минимума ($Nb/Nb^* = 0,26$ и $0,44$) в монцонитах докембрийских даек. Характерна разная степень разделения РЗЭ – в типичных долеритах отношение $(La/Yb)_n = 4,32–5,97$, а в монцонитах оно возрастает почти вдвое до $9,78–11,82$.

В глубинных условиях реализуется анортозитовый тип дифференциации расплава [19]. Неотъемлемым признаком такой эволюции расплава служат обособления анортозитовых габбро-долеритов в разрезе тел. Подобные интрузивы встречаются как среди пермо-триасовых трапповых тел (Биллэхский интрузив), так и среди среднепалеозойских даек (Усть-Ханнинский интрузив). В составе таких тел установлены минералы, не совместимые с условиями внутрикамерной дифференциации толеитового расплава на гипабиссальном уровне – анортит-битовнит, хри-

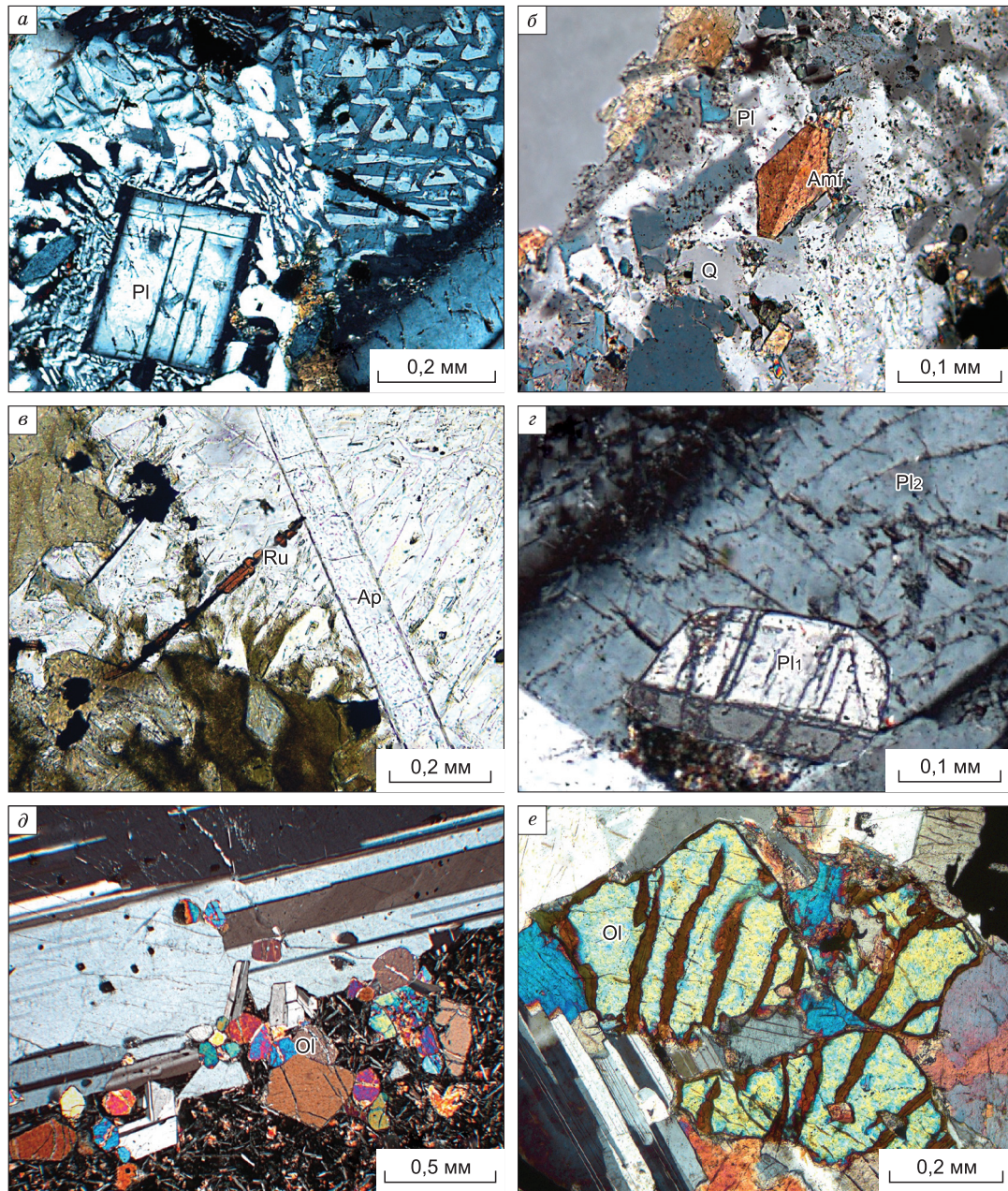


Рис. 3. Структуры пород дифференцированных даек:

a–в – Нюрбинская дайка с монзонитоидным типом дифференциации (*a* – кварцевый габбро-долерит. Микрографическое срастание (MP) кварца с полевым шпатом, *б* – монзонит-порфир. Кристалл сдвойникованной роговой обманки (Amf) в кварц (Q)-полевошпатовом (Pl) агрегате, *в* – монзонит-порфир. Кристалл апатита (Ap) и кристалл рутила (Ru) в кварц-полевошпатовом агрегате; *г–е* – Усть-Ханнинская дайка с анортозитовым типом дифференциации (*г* – оплавленное зерно плагиоклаза I – An₈₆ (Pl₁) в серицитизированной порфировой таблице битовнита An₇₉ (Pl₂), *д* – Скопление ксеноморфных кристаллов гиалосидерита (Ol₂), *е* – замещение оливина (Ol) боулингитом по трещинам).

Fig. 3. Rock structure of differentiated dykes.

a–в – the Nyurba dyke with monzonitoid-type differentiation (*a* – quartz gabbro-dolerite. Micro-graphic fusion (MP) of quartz and feldspar, *б* – monzonit-porfir. Twinned hornblende (Amf) crystal in quartz-feldspar aggregate, *в* – monzonit-porfir. Apatite and rutile crystals in quartz (Q)-feldspar (Pl) aggregate), *г–е* – Ust-Khanninskaya dyke with anorthosite-type differentiation (*г* – melted plagioclase I – An₈₆ (Pl₁) grain in sericitized porphyry table of An₇₉ table bitovnite (Pl₂), *д* – accumulation of xenomorphic hyalosi-derite (Ol₂) crystals, *е* – olivine (Ol) replacement with bowling).

Таблица 2

Химический (мас %) и микроэлементный (г/т) состав базитов сложных даек

Table 2

Chemical (wt.%) and trace element (g/t) composition basites of complex dike

Компоненты	Нюрбинская дайка (скв. 24/87 – глубина, м)					Кенгединский дайковый пояс				
	510	579,5	827	708,3	724	АБ-43-1	АБ-43-3	АБ-44-1	АБ-43-2	600/6
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	46,87	49,55	50,4	54,1	54,54	48,34	48,96	48,51	64,61	55,38
TiO ₂	4,21	3,1	3,17	2,32	2,52	2,62	2,46	2,67	0,9	2,39
Al ₂ O ₃	13,74	14,69	12,99	12,28	12,26	13,01	13,48	12,43	13,15	15,11
Fe ₂ O ₃	3,7	4,44	2,72	3,00	3,00	5,88	5,53	5,69	4,63	3,25
FeO	11,22	8,78	11,68	9,24	9,51	9,85	10,06	10,87	3,62	7,9
MnO	0,14	0,15	0,19	0,1	0,15	0,15	0,14	0,23	0,07	0,17
MgO	4,62	3,88	3,54	4,43	3,32	5,95	4,92	5,9	1,81	3,19
CaO	8,11	7,62	7,4	3,02	3,23	8,56	7,85	8,72	1,05	3,79
Na ₂ O	2,86	3,22	3,05	1,95	2,82	2,61	2,76	2,48	4,49	3,63
K ₂ O	1,78	1,86	1,21	5,58	5,06	0,94	1,34	0,97	3,27	2,83
P ₂ O ₅	0,67	0,72	0,69	0,67	0,72	0,25	0,22	0,31	0,28	0,53
Mg#	36	35	31	40	33	41	37	40	29	34
Rb	27,6	38,07	32,74	34,36	148	20,5	37,4	21,0	63,1	78,3
Ba	178	252	221	320	629	277	280	323	682	802
Th	4,92	6,46	5,96	23,51	24,02	2,15	2,04	2,93	13,7	8,93
U	1,43	1,89	1,68	6,25	6,61	0,45	0,49	0,57	2,77	1,94
Nb	52,4	61,38	64,29	81,94	80,09	14,2	13,7	16,2	23,8	26,1
Ta	3,58	4,17	4,32	6,06	6,22	1,05	1,02	1,20	1,77	1,94
Zr	467	577	589	971	965	179	182	210	670	445
Hf	11,04	13,92	13,73	23,97	24,05	4,44	4,60	4,93	16,1	10,2
Y	58,01	66,9	70,71	80,37	88,71	29,4	32,0	31,90	65,50	37,70
Sr	474	384	340	313	402	311	340	307	144	328
La	47,74	56,42	54,05	114,5	112,9	18,6	18,3	22,8	81,7	52,7
Ce	108	133	127	252	254	44,6	43,8	52,8	172	116
Pr	13,77	17,41	16,17	29,6	30,42	5,71	5,75	6,92	19,9	14,1
Nd	58,92	73,46	71,9	116	123	26,0	26,0	30,9	80,0	57,2
Sm	14,07	16,71	16,86	24,09	25,12	5,96	6,23	7,07	15,6	11,5
Eu	3,58	4,18	4,28	4,4	5,61	1,97	2,09	2,20	4,47	3,44
Gd	13,63	16,43	16,64	20,6	22,55	6,17	6,52	6,89	14,6	10,1
Tb	2,12	2,5	2,53	3,18	3,38	0,928	1,02	1,02	2,11	1,40
Dy	11,7	14,34	14,47	17,65	18,71	5,81	6,41	6,16	12,7	8,03
Ho	2,35	2,81	2,88	3,45	3,67	1,09	1,25	1,23	2,54	1,45
Er	5,84	7,12	7,43	8,84	9,1	2,99	3,68	3,47	7,14	3,98
Tm	0,84	1,02	1,01	1,26	1,3	0,39	0,46	0,45	0,91	0,51
Yb	4,96	6,24	5,96	7,73	7,91	2,64	3,04	2,74	5,99	3,20
Lu	0,72	0,87	0,85	1,08	1,11	0,36	0,41	0,37	0,90	0,47
Ni	59,8	12,5	28,3	27,6	23,9	87,4	74,0	84,7	16,3	23,5
Co	39,62	30,6	36,49	29,18	25,82	56	53	53	15	25
Cr	33,07	8,7	33,6	62,35	15,62	114	78,5	131	23,2	104

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
V	352	215	279	165	148	426	375	400	53,0	127
Zn	106	131	199	56,86	136	83,6	135	93,6	96,0	119
Cu	318	235	285	97,35	180	186	179	176	58,7	111
Pb	2,26	4,33	6,95	1,07	3,03	3,97	2,47	2,92	4,79	24,7
Σ PЗЭ	288	353	342	604	619	123	125	145	420	284
(La/Yb) _n	6,90	6,49	6,51	10,63	10,24	5,05	4,32	5,97	9,78	11,82
Eu/Eu*	0,78	0,76	0,77	0,59	0,71	0,98	1,00	0,95	0,89	0,95
Nb/Nb*	1,24	1,16	1,30	0,57	0,56	0,81	0,81	0,72	0,26	0,44

Примечание. 510 – краевые офитовые долериты, 579,1 и 827 – кварцевые габбро-долериты, 708,3 и 724 – монзонит-порфиры; АБ-43-1, АБ-43-3, АБ-44-1 – долериты; АБ-43-2, 600/6 – монзонит-порфиры.

Note. 510 – marginal ophitic dolerites, 579,1 and 827 – quartz gabbro-dolerites, 708,3 and 724 – monzonite-porphyry; АБ-43-1, АБ-43-3, АБ-44-1 – dolerites; АБ-43-2, 600/6 – monzonite-porphyry.

золит, хромшпинелид, муассанит, гранат, дистен, самородные и интерметаллические соединения [20]. Формирование подобных тел происходило в обстановке глубинного промежуточного очага при закрытии магмопроницаемых зон [19]. Расплав начал эволюционировать на глубине 35–40 км от палеоповерхности при давлении не менее 10 кбар, и как показали результаты гомогенизации расплавных включений в битовните, при температуре 1450–1300 °С [21]. В таких условиях первыми из силикатов кристаллизуются форстерит-хризолитовый оливин и плагиоклаз анортит-битовнитового состава. Это отразилось в некотором повышении кальциевости и глиноземистости, а также соответствующем этому понижении железистости и магниальности анортозитовых пород относительно вмещающих их оливиновых габбро-долеритов (табл. 3). В геохимическом отношении наблюдается снижение концентраций Ni, Co, Cr и Zn. Характерной геохимической чертой анортозитовых габбро-долеритов, в отличие от вмещающих их оливиновых долеритов, в особенности в Усть-Ханьинском интрузиве, являются высокие содержания Sr и Ba (см. рис. 2, з) в обогащенных раннемагматическим плагиоклазом породах. Отмечается устойчивое повышение халькофильных элементов Pb и Cu. Анортозиты среднего палеозоя сохраняют основные черты, свойственные этой возрастной группе – повышенные содержания K, Ti, P. В них наряду с основным плагиоклазом, присутствуют и более кислые его разновидности внутрикамерного этапа, а также акцессорные минералы – апатит, биотит, роговая обманка, которые являются концентраторами многих несовместимых элементов. Подоб-

но вышерассмотренным примерам пермо-триасовых траппов Нижне-Томбинского интрузива и среднепалеозойских базитов Нюрбинской дайки, среднепалеозойские долериты Усть-Ханьинской дайки с признаками анортозитовой дифференциации в отличие от пермо-триасового Биллэхского силла с анортозитовыми долеритами также несколько более обогащены всеми несовместимыми элементами (см. рис. 2, з).

Заключение

Рассмотрено поведение примесных элементов на разных этапах эволюции толеит-базальтовых расплавов. Основную роль в вещественном составе магматических расплавов играет геодинамическая обстановка. Она определяет исходный уровень концентраций породообразующих и примесных элементов. Большое влияние на состав расплава, из которого кристаллизуются магматические породы, играют *PT*-условия выплавки, глубина зарождения, состав мантийного субстрата. Существенно меняется состав родоначальных магм при процессах фракционно-кристаллизационной дифференциации. Она имеет место на различных этапах существования магматической системы, но в любых условиях идет в сторону образования все более кислых и щелочных пород. В геохимическом плане эволюция толеит-базальтового расплава *in situ* приводит к классическому снижению концентраций сидерофильных элементов и обогащению остаточных расплавов литофильными. При этом происходит также рост содержаний HFSE и всей суммы REE, при незначительном разделении последних. В глубинных камерах более активно происходит нако-

Таблица 3

Химический (мас %) и микроэлементный (г/т) состав анортозитовых габбро-долеритов

Table 3

Chemical (wt. %) and trace element (g/t) composition of anorthosite gabbro-dolerites

Инtruзив	Биллэхский						Усть-Ханнинский	
Компоненты	T-21-2a	T-21-2д	T-21-1a	T-20-1в	T-20-1з	T-20-1л	ЛН-1	ЛН-8
1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	49,29	47,87	48,18	48,44	48,08	49,89	46,98	46,15
TiO ₂	0,94	1,03	1,55	1,61	1,61	1,46	2,64	3,38
Al ₂ O ₃	17,95	20,42	15,23	14,72	15,02	14,38	12,97	11,54
Fe ₂ O ₃	3,53	4,13	3,57	3,58	2,8	3,68	6,87	4,89
FeO	6,79	5,01	9,50	10,72	11,08	9,64	6,5	12,43
MnO	0,12	0,15	0,20	0,16	0,21	0,1	0,08	0,25
MgO	5,35	4,47	7,35	5,83	6,63	5,81	5,94	7,12
CaO	11,52	11,32	10,51	10,85	10,3	10,39	9,92	8,90
Na ₂ O	2,56	2,94	2,11	2,45	2,46	2,50	2,23	2,10
K ₂ O	0,71	0,56	0,81	0,52	0,53	0,63	2,77	1,14
P ₂ O ₅	0,16	0,14	0,21	0,32	0,16	0,28	0,75	0,38
Mg#	49	48	51	43	46	44	45	43
Rb	19	19	19	9,76	11	12	35,7	24,6
Ba	156	158	115	183	171	189	491	296
Th	0,93	1,2	1,2	2,39	2,41	2,67	3,58	3,05
U	0,40	0,50	0,45	0,47	0,46	0,47	1,07	0,96
Nb	4,1	5,3	4,5	5,5	5,1	5,3	38,4	31,9
Ta	0,13	0,18	0,18	0,39	0,43	0,43	2,62	2,24
Zr	93	105	99	81	77	83,4	304	268
Hf	1,7	1,9	2,0	2,2	2,1	2,2	7,42	6,69
Y	19	24	28	26,8	26,7	28	43,79	39,73
Sr	261	310	214	216	222	224	2409	429
La	7,2	9,9	8,9	9,12	8,98	9,43	31,93	28,7
Ce	18	23	21	22,1	21,5	22,7	74,52	66,31
Pr	2,2	3,0	3,1	3,0	2,9	3,1	9,85	8,74
Nd	11	14	14	13,9	13,9	14,4	42,4	38,24
Sm	2,9	3,6	4,0	4,06	4,03	4,24	9,63	8,84
Eu	0,88	1,2	1,5	1,49	1,33	1,44	2,86	2,37
Gd	2,8	3,8	4,5	4,9	4,54	4,95	9,51	8,85
Tb	0,53	0,67	0,82	0,80	0,81	0,87	1,46	1,39
Dy	3,6	4,4	5,0	5,29	5,26	5,47	8,73	8,22
Ho	0,74	0,92	1,0	1,11	1,11	1,16	1,83	1,65
Er	2,1	2,7	3,0	3,13	3,07	3,26	4,74	4,45
Tm	0,27	0,35	0,41	0,46	0,47	0,48	0,7	0,63
Yb	1,7	2,3	2,8	2,87	2,87	3,09	4,19	3,95
Lu	0,26	0,34	0,40	0,43	0,43	0,46	0,63	0,57
Ni	63	45	141	117	120	115	49	107
Co	30	27	53	50	47	46	36	53
Cr	227	178	342	275	244	227	184	378

1	2	3	4	5	6	7	8	9
V	179	262	291	302	302	309	315	297
Sc	21	26	37	36	40	45	31	30
Zn	88	67,4	131	132	126	118	84	130
Cu	214	219	153	137	159	139	240	212
Pb	34,7	12,9	5,0	5,2	4,8	4,8	15,9	5,1
Σ PЗЭ	54,37	70,24	70,85	72,69	71,24	75,09	203	183
(La/Yb) _n	2,96	3,03	2,29	2,28	2,24	2,19	5,47	5,21
Eu/Eu*	0,95	0,94	1,09	1,02	0,95	0,96	0,90	0,81
Nb/Nb*	0,57	0,57	0,50	0,43	0,39	0,38	1,30	1,23

Примечание. Т-21-2а и Т-21-2д – анортозитовые габбро-долериты, Т-21-1а, Т-20-1в, Т-20-1з, Т-20-1л – оливиновые габбро-долериты пермо-триасового Биллэхского интрузива; ЛН-1 – анортозитовые габбро-долериты, ЛН-8 – оливиновые габбро-долериты среднепалеозойского Усть-Ханнинского интрузива.

Note. Т-21-2а and Т-21-2д – anorthosite gabbro-dolerites, Т-21-1а Т-20-1д, Т-20-1з – olivine gabbro-dolerites; ЛН-1 anorthosite gabbro-dolerites, ЛН-8 – olivine gabbro-dolerites.

пление легких редких земель цериевой группы, что приводит к существенному разделению REE, высокие отношения $(La/Yb)_n$ характерны для пород повышенной щелочности монцоитоидного ряда. Ярким показателем процессов дифференциации служит распределение стронция. На ранней внутрикамерной или докамерной стадии эволюции расплава, без активного роста щелочей, всегда содержание элемента возрастает, а в конечных породах фиксируются минимальные значения элемента. Часто в высокощелочных породах подобно стронцию ведет себя Eu^{2+} .

Литература

1. Гайдук В.В. Вилуйская среднепалеозойская рифтовая система. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1988. 122 с.
2. Олейников Б.В., Шпунт Б.Р., Томишин М.Д. Геодинамические обстановки проявлений базитового магматизма на Сибирской платформе в неогее // Магматические формации в геологической истории и структуре земли. Свердловск, 1989. С. 86–109.
3. Прокопьев А.В., Парфенов Л.Н., Томишин М.Д., Колодезников И.И. Чехол Сибирской платформы и смежных складчато-надвиговых поясов // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. С. 113–155.
4. Томишин М.Д., Копылова А.Г. Фанерозойские базиты восточной части Сибирской платформы // Наука и образование. 2015. С. 23–28.
5. Tomshin M.D., Kopylova A.G., Vasileva A.E., Gogoleva S.S. Geochemistry of Phanerozoic basites from the eastern part of the Siberian platform // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConferences. Al-

bena, Bulgaria, 2018. Vol. I. P. 135–142. DOI:10.5593/SGEM2018/1.1/S01.018

6. Антипин В.С., Макрыгина В.А. Геохимия эндогенных процессов. Иркутск: Изд-во Ирк. гос. ун-та, 2008. 363 с.

7. Виленский А.М. Петрология интрузивных траппов севера Сибирской платформы. М.: Наука, 1967. 272 с.

8. Томишин М.Д., Копылова А.Г., Салихов Р.Ф. Нижне-Томбинский трапповый комплекс (северо-восток Тунгусской синеклизы) // Отечественная геология. 2016. № 5. С. 52–62.

9. Tomshin M.D., Kopylova A.G., Vasilyeva A.E., Zaitsev A.I. Geochemical and isotope characteristics of intrusive traps in the eastern Siberian Platform // 14th Geo-Conferences on Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. Conference Proceedings. Albena, Bulgaria, 2014. Vol. I. P. 113–120.

10. Макрыгина В.А. Геохимия отдельных элементов. Новосибирск. Академическое издательство «ГЕО», 2011. 191 с.

11. Интерпретация геохимических данных под ред. Е.В. Склярова. М.: Интермет инжиниринг, 2001. 287 с.

12. Томишин М.Д., Копылова А.Г., Константинов К.М., Гоголева С.С. Базиты Вилуйского палеорифта. Геохимия и последовательность становления // Геология и геофизика, 2018. Т. 59, № 10. С.1503–1518. DOI: 10.15372/GiG20181002

13. Томишин М.Д., Похиленко Н.П., Тарских Е.В. Морфология кимберлитовой трубки Нюрбинская и ее взаимоотношение с долеритовой дайкой // Докл. РАН. 2017. Т. 477, № 5. С. 600–605. DOI: 7868/SO869565217350201.

14. Kopylova A.G., Tomshin M.D., Gogoleva S.S., Vasileva A.E. Geochemical particularities of basites from ancient paleorifts of the Siberian platform // Paper for

19th International Multidisciplinary Scientific GeoConferences SGEM. Albena, Bulgaria, 2019. Vol. 19. P. 203–210. DOI:10.5593/SGEM/2019/1.1/SO1.025

15. Томишин М.Д., Олейников Б.В., Королева О.В. Монцитонитовая тенденция глубинной эволюции толеит-базальтовой серии расплавов на Сибирской платформе // Петролого-геохимические черты глубинной эволюции вещества кимберлитовой и базитовой магматических систем. Якутск, 1985. С. 164–188.

16. Королева О.В. Особенности состава и генезис ассоциаций основных и щелочно-кремнекислых магматитов Сибирской и Индостанской платформ // Трап-пы Сибири и Декана. Черты сходства и различия. Новосибирск: Наука, 1991.

17. Мащак М.С., Олейников Б.В., Копылова А.Г. Базиты Анабарского массива // Петрология и геохимия позднепалеозойских интрузивных базитов Сибирской платформы. Новосибирск: Наука, 1983. С. 7–64.

18. Королева О.В., Округин А.В., Рихванов Л.Л. Сложные дайки Анабарского массива – индикаторы рифтогенных процессов // Геология и тектоника плат-

форм и орогенных областей Северо-Востока Азии. Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 1999. Т. II. С. 80–84.

19. Олейников Б.В., Томишин М.Д. Глубинная дифференциация магмы платформенных базитов // Докл. АН СССР. 1976. Т. 231, № 1. С.177–180

20. Олейников Б.В., Округин А.В. Акцессорные минералы довнутрикамерного этапа эволюции вещества базитов Сибирской платформы // Петролого-геохимические черты глубинной эволюции вещества кимберлитовой и базитовой магматических систем. Якутск, 1985. С. 89–129.

21. Олейников Б.В., Панков В.Ю. Расплавные включения и минералы-узники в продуктах протокристаллизации базальтового расплава // Петролого-геохимические черты глубинной эволюции вещества кимберлитовой и базитовой магматических систем. Якутск, 1985. С. 130–163.

22. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes.// Magmatism in the ocean basins. Geol. Soc. Spec. Public. 1989. Vol. 42. P. 313–345.

Поступила в редакцию 22.12.2020

Принята к публикации 04.02.2021

Об авторе

КОПЫЛОВА Альбина Георгиевна, научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-6577-9615>, Kopylova@diamond.ysn.ru

Информация для цитирования

Копылова А.Г. Распределение редких элементов на разных этапах эволюции рифейских и фанерозойских толеит-базальтовых расплавов на востоке Сибирской платформы // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021. Т. 26, № 1. С. 17–31. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-1-2>

DOI 10.31242/2618-9712-2020-26-1-2

Distribution of rare elements at different evolutionary stages of Riphean and Phanerozoic tholeiite-basalt melts in the eastern part of the Siberian platform

A.G. Kopylova

Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russia
Kopylova@diamond.ysn.ru

Abstract. Basite magmatism has been manifested repeatedly for a long time in various geodynamic structures within the eastern part of the Siberian platform. In the Late Precambrian and Middle Paleozoic, it was related to rifting processes, and in the Late Paleozoic-Early Mesozoic – to the initiation and development of trap synclises. Differences of the geodynamic regime of magma formation are displayed in the material composition of rocks. This article presents a generalizing study of the petro-geochemical features

of the tholeiitic basaltic melts formed in different geodynamic settings. The composition of initial magmas changes significantly at different stages of the development of magmatic system. Using multicomponent analysis, we reviewed the influence of fractionation processes of the basal melt, which occurred under various PT conditions, on its chemical composition. A significant change of the composition occurs during the intra-chamber differentiation of the melt in a sequence of rock strata varied from the basic magnesian to felsic alkaline rocks. In the resulting series of rocks, the content of rare elements included in the lattice of the early femic phases decreases, as well as the accumulation of almost all incompatible elements. The evolution of melts of normal alkalinity occurs with an increase in REE content and their insignificant separation. Intrusions that have undergone the stage of high-pressure fractionation in the deep transitional chamber are of particular importance. As a result of such differentiation, a peculiar group of rocks is formed in the cross section of bodies, such as monzonite-porphyrries in one case and anorthosite gabbro-dolerites in the other. It is established that the monzoitoid type of differentiation is characterized by accumulation of LREE, LITE and the elements of zirconium group Nb, Ta, Hf and Y. Isolation of anorthosite gabbro-dolerites in the cross-section of bodies, as well as an increase in the content of aluminum, calcium, and strontium in them, is an indication of the anorthositic tendency of magmatic melt differentiation.

Key words: eastern part of the Siberian platform, basites, monzonites, anorthosites, trace element composition.

Acknowledgements. The study was carried out according to the plan of research and development work of the Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS (Project 0381-2019-0003) and was financially supported by the RFBR under Project No. 18-45-140043 p_a. Author expresses gratitude to A.V. Okrugin for his constructive comments to this article.

References

1. Gaiduk V.V. Vilyuiskaya srednepaleozoiskaya riftovaya sistema. Yakutsk: YaF SO AN SSSR, 1988. 122 p.
2. Oleinikov B.V., Shpunt B.R., Tomshin M.D. Geodinamicheskie obstanovki proyavlenii bazitovogo magmatizma na Sibirskoi platforme v neogee // Magmaticheskie formatsii v geologicheskoi istorii i strukture zemli. Sverdlovsk, 1989. P. 86–109
3. Prokopen V.A., Parfenov L.N., Tomshin M.D., Kolo-deznikov I.I. Chekhol Sibirskoi platformy i smezhnykh skladchato-nadvigovykh pojasov // Tektonika, geodinamika i metallogeniya territorii Respubliki Sakha (Yakutiya). M.: MAIK «Nauka/ Interperiodika», 2001. P. 113–155.
4. Tomshin M.D., Kopylova A.G. Fanerozoiskie bazity vostochnoi chasti Sibirskoi platformy // Nauka i obrazovanie. 2015, No. 4. P. 23–28.
5. Tomshin M.D., Kopylova A.G., Vasileva A.E., Gogoleva S.S. Geochemistry of Phanerozoic basites from the eastern part of the Siberian platform // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConferences. Albena, Bulgaria, 2018. Vol. I. P. 135–142. DOI:10.5593/SGEM2018/1.1/S01.018
6. Antipin V.S., Makrygina V.A. Geokhimiya endogennykh protsessov. Irkutsk: Izd-vo Irk. gos. un-ta, 2008. 363 p.
7. Vilenskii A.M. Petrologiya intruzivnykh trappov severa Sibirskoi platformy. M.: Nauka, 1967. 272 p.
8. Tomshin M.D., Kopylova A.G., Salikhov R.F. Nizhne-Tombinskii trappovyi kompleks (severo-vostok Tunguskoi sineklizy) // Otechestvennaya geologiya. 2016. No. 5. P. 52–62.
9. Tomshin M.D., Kopylova A.G., Vasilyeva A.E., Zaitsev A.I. Geochemical and isotope characteristics of intrusive traps in the eastern Siberian Platform // 14th Geo-Conferences on Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. Conference Proceedings. Albena, Bulgaria, 2014. Vol. I. P. 113–120.
10. Makrygina V.A. Geokhimiya otdelnykh elementov. Novosibirsk: Akademicheskoe izdatelstvo «GEO», 2011. 191 p.
11. Interpretatsiya geokhimicheskikh dannyykh. Pod red. E.V. Sklyarova. M.: Internet inzhiniring, 2001. 287 p.
12. Tomshin M.D., Kopylova A.G., Konstantinov K.M., Gogoleva S.S. Bazity Vilyuiskogo paleorifta. Geokhimiya i posledovatelnost stanovleniya // Geologiya i geofizika, 2018. Vol. 59, No. 10. P. 1503–1518. DOI: 10.15372/GiG20181002
13. Tomshin M.D., Pokhilenko N.P., Tarskikh E.V. Morfologiya kimberlitovoi trubki Nyurbinskaya i ee vzaimootnoshenie s doleritovoi daikoi // Dokl. RAN. 2017. Vol. 477, No. 5. P. 600–605.
14. Kopylova A.G., Tomshin M.D., Gogoleva S.S., Vasileva A.E. Geochemical particularities of basites from ancient paleorifts of the Siberian platform // Paper for 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConferences SGEM. Albena, Bulgaria, 2019. Vol. 19. P. 203–210. DOI:10.5593/SGEM/2019/1.1/SO1.025
15. Tomshin M.D., Oleinikov B.V., Koroleva O.V. Montsonitoidnaya tendentsiya glubinnoi evolyutsii toleit-bazaltovoi serii rasplavov na Sibirskoi platforme // Petrologo-geokhimicheskie cherty glubinnoi evolyutsii veshchestva kimberlitovoi i bazitovoi magmaticheskikh sistem. Yakutsk, 1985. P. 164–188.
16. Koroleva O.V. Osobennosti sostava i genezis asotsiatsii osnovnykh i shchelochno-kremnekislykh mag-

matitov Sibirskoi i Indostanskoi platform // Trappy Sibiri i Dekana. Cherty skhodstva i razlichiya. Novosibirsk: Nauka, 1991.

17. *Mashchak M.S., Oleinikov B.V., Kopylova A.G.* Bazity Anabarskogo massiva // Petrologiya i geokhimiya pozdnepaleozoiskikh intruzivnykh bazitov Sibirskoi platformy. Novosibirsk: Nauka, 1983. P.7–64.

18. *Koroleva O.V., Okrugin A.V., Rikhvanov L.L.* Slozhnye daiki Anabarskogo massiva – indikatory riftogennykh protsessov. // Geologiya i tektonika platform i orogennykh oblastei Severo-Vostoka Azii. Yakutsk: Izd-vo IaNTs SO RAN, 1999. Vol. II. P. 80–84.

19. *Oleinikov B.V., Tomshin M.D.* Glubinnaia differentsiatsiia magmy platformennykh bazitov // DAN SSSR. 1976. Vol. 231, No. 1. P. 177–180.

20. *Oleinikov B.V., Okrugin A.V.* Aktsessornye mineraly dovnutrikamernogo etapa evoliutsii veshchestva bazitov Sibirskoi platformy // Petrologo-geokhimicheskie cherty glubinnoi evoliutsii veshchestva kimberlitovoi i bazitovoi magmaticheskikh sistem. Yakutsk, 1985. P. 89–129.

21. *Oleinikov B.V., Pankov V.Iu.* Rasplavnye vklucheniia i mineraly-uzniki v produktakh protokristallizatsii bazaltovogo raspava // Petrologo-geokhimicheskie cherty glubinnoi evoliutsii veshchestva kimberlitovoi i bazitovoi magmaticheskikh sistem. Yakutsk, 1985. P. 130–163.

22. *Sun S.S., McDonough W.F.* Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Magmatism in the ocean basins. Geol. Soc. Spec. Public. 1989. Vol. 42. P. 313–345.

About the author

KOPYLOVA Albina Georgievna, Researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia,
Kopylova@diamond.ysn.ru

Citation

Kopylova A.G. Distribution of rare elements at different evolutionary stages of Riphean and Phanerozoic tholeiite-basalt melts in the eastern part of the Siberian platform // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2021. Vol. 26, No. 1. pp. 17–31. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-1-2>