

## ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И ИЗОТОПНЫЕ (O, Sr, Nd) СВИДЕТЕЛЬСТВА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАНТИЙНЫХ И КОРОВЫХ МАГМ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ БАЗАЛТ-АНДЕЗИТ-ТРАХИТ-РИОЛИТОВОЙ СЕРИИ БАТЕНЕВСКОГО ПОДНЯТИЯ МИНУСИНСКОГО ПРОГИБА

А.А. Воронцов<sup>1,2</sup>, В.В. Ярмолюк<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

Рассмотрены вопросы образования ранне-среднедевонских вулканических толщ быскарской серии Батеневского поднятия Минусинского прогиба. Вулканическая ассоциация представлена породами широкого диапазона составов от базальтов до риолитов. Установлено, что изменения составов пород подчиняются законам фракционирования только в диапазоне составов базальт – трахиандезит – трахит (47,7–64,5 мас. % SiO<sub>2</sub>). Геохимические характеристики пород диапазона SiO<sub>2</sub> = 65–74 мас. % отвечают продуктам смешения дифференциатов мантийных магм с анатектическими коровыми выплавками, состав которых представляют риолиты (~ 77 мас. % SiO<sub>2</sub>).

**Ключевые слова:** Минусинский прогиб, рифтогенез, девонский вулканизм, редкие элементы, изотопы, фракционирование, контаминация, магматические источники.

### Введение

Минусинский прогиб является одной из крупнейших структур девонской Алтае-Саянской рифтовой системы и охватывает территорию около 100 000 км<sup>2</sup>. Прогиб возник в пределах раннепалеозойской (каледонской) области Центрально-Азиатского складчатого пояса спустя 70–80 млн лет после завершения орогенических процессов в ее пределах. Образование прогиба было сопряжено с вулканической активностью, что определило доминирование вулканических пород в строении выполняющих его ранне-среднедевонских толщ [Лучицкий, 1960]. Толщи вулканических пород, как правило, залегают со структурным несогласием на додевонском складчатом фундаменте. Они обнажаются на бортах прогиба и в пределах поднятий, одним из которых является Батеневское. В его строении участвуют породы широкого диапазона составов: умеренно-высокотитанистые и низкотитанистые базальты, базальтовые трахиандезиты, трахиандезиты, трахиты, трахидациты и риолиты. В последние годы был получен большой объем геологической, геохимической и изотопной (O, Sr, Nd, Pb) информации по составу пород дифференцированной вулканической ассоциации Батеневского поднятия, что позволило рассмотреть вопросы ее происхождения.

### Методы исследований

Вулканические толщи Батеневского поднятия изучались комплексом методов: петрографических, петрохимических, геохимических и изотопных.

Петрографические и петрохимические характеристики магматических пород базируются на результатах изучения 90 образцов и проб, которые охватывают все известные в изученном районе петрографические разновидности. Содержания петрогенных элементов (табл. 1) были определены в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН рентгенофлуоресцентным методом на многоканальном спектрометре СРМ-25 по методике [Афонин, Гуничева, Пискунова, 1984].

Редкие элементы (табл. 1) определены методом ICP-MS в ЦКП ИНЦ СО РАН Байкальского аналитического центра на масс-спектрометре с высоким разрешением ELEMENT-2 Finnigan MAT. Измерения проводились при стандартных операционных условиях для данного прибора. Для нивелирования возможного матричного эффекта и учета нестабильности в течение процедуры съемки спектров использован внутренний стандарт Rh. Для градуирования при расчетах содержаний элемента в пробе использованы многоэлементные сертифицированные растворы (CLMS-1, -2, -4, SPEX, США). Пробоподготовка для пород основного и среднего составов осуществлялась открытым кислотным разложением, для кислых вулканитов – сплавлением с метаборатом лития.

Для изотопного анализа кислорода использовались полевые шпаты без следов вторичных изменений (в виде осколков) общим весом 1,5–2,5 мг.

Измерения выполнены в Геологическом институте БНЦ СО РАН на газовом масс-спектрометре Finnigan MAT 253 с использованием двойной системы напуска в классическом варианте (стандарт – образец).

Таблица 1

Составы представительных пород девонской магматической ассоциации Батеневского поднятия

Table 1

## Compositions of representative rocks of Devonian igneous assemblage of Batenevo Rise

Компонент	БАТ1/12	БАТ1/25	БАТ1/32	БАТ3/4	БАТ3/23	БАТ4/2	БАТ4/5	БАТ4/9	БАТ4/10	БАТ4/11	БАТ4/12	БАТ5/8	БСК1/5
SiO <sub>2</sub>	74,07	64,51	69,65	49,02	48,66	68,52	69,39	51,06	54,95	53,30	64,03	62,60	76,63
TiO <sub>2</sub>	0,31	0,94	0,57	1,60	1,56	0,41	0,50	1,51	1,40	1,42	1,03	0,83	0,21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,23	15,73	14,44	18,00	17,45	15,22	14,67	17,54	16,90	17,26	14,94	16,39	11,59
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	2,78	5,61	3,82	9,85	11,63	3,09	3,68	10,57	8,52	8,32	5,85	5,13	2,15
MnO	0,03	0,14	0,13	0,16	0,19	0,17	0,06	0,18	0,14	0,16	0,14	0,12	0,03
MgO	0,29	0,57	0,23	3,69	4,59	0,50	0,31	3,30	2,46	3,01	0,75	1,75	0,29
CaO	0,53	1,13	0,68	8,29	9,31	1,53	1,16	8,73	7,08	7,46	3,12	3,07	1,00
Na <sub>2</sub> O	4,69	6,35	5,05	4,53	3,41	5,06	5,65	3,29	3,60	3,56	4,15	4,37	3,75
K <sub>2</sub> O	2,34	3,04	4,80	1,65	1,01	4,05	3,80	1,33	2,23	2,05	3,10	3,26	3,28
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,10	0,21	0,11	0,62	0,45	0,08	0,07	0,46	0,65	0,66	0,25	0,28	0,07
П.п.п.	3,55	1,78	0,60	2,44	1,90	1,32	0,68	2,03	2,00	2,74	2,64	2,05	0,91
Сумма	99,90	99,99	100,07	99,85	100,15	99,95	99,97	99,99	99,92	99,92	99,99	99,86	99,92
к.а.п.	0,80	0,76	0,93			0,80	0,84				0,64		0,82
δ <sup>18</sup> O, ‰ (ПП)	13,8	12	13,4	9,1	8,5	13,5	13,2	8,8	8,8	8,7	11,9	9,8	14,2
Rb	38	57	98,0	39	17	89	92	32	63	51	95	104	58
Ba	1479	837	521	804	380	1478	575	431	646	926	1290	820	1232
Sr	229	341	178	1118	727	375	282	683	672	675	409	763	149
Zr	179	392	480	168	145	353	486	201	263	259	374	269	161
Nb	9,8	22	24	10,8	7,3	21	28	11,0	14,8	15	24	16	13
Hf	4,27	9,4	11,3	4,09	3,60	9,5	13,3	4,95	6,3	6,3	10,2	6,3	4,2
Ta	1,32	1,27	1,54	0,64	0,36	1,38	1,89	0,66	0,89	0,87	1,47	1,19	1,15
Y	12,2	47	55	34	32	44	61	35	39	37	46	29	10
Th	12,2	9,8	13,5	3,18	2,22	10,1	14,0	4,72	9,8	9,4	11,1	12,8	9,6
U	5,2	2,75	3,48	1,42	0,84	2,78	3,94	1,48	3,09	2,98	3,09	3,53	2,56
Pb	13,8	14,1	19	5,3	4,81	9,8	17	8,1	11,3	12,4	9,6	18	5
La	26	55	69	35	26	53	48	34	53	52	57	44	12
Ce	51	120	146	78	63	114	99	75	117	114	124	91	25
Pr	5,3	15	19	9,7	7,9	13,4	11,3	9,2	13,6	13,3	14,3	10,8	3,2
Nd	20	60	69	42	34	54	46	39	56	55	59	41	12
Sm	3,42	11,8	12,7	8,3	7,1	9,6	8,9	7,8	10,7	10,4	11,1	7,4	2,2
Eu	0,74	3,16	2,31	2,56	2,19	2,30	1,81	2,24	2,84	2,90	2,89	1,66	0,49
Gd	2,75	10,9	11,3	8,3	7,1	9,7	9,8	7,8	10,2	9,7	11,4	6,2	2,0
Tb	0,40	1,77	1,91	1,28	1,13	1,38	1,58	1,28	1,58	1,52	1,57	0,84	0,35
Dy	2,53	9,7	10,9	6,7	6,2	8,2	10,3	6,8	7,8	7,5	9,3	6,2	1,9
Ho	0,50	2,10	2,45	1,32	1,26	1,62	2,28	1,39	1,56	1,51	1,78	1,17	0,43
Er	1,44	5,5	6,4	3,72	3,58	4,94	7,1	3,98	4,25	4,21	5,2	3,42	0,8
Tm	0,22	0,87	1,05	0,54	0,52	0,74	1,04	0,59	0,63	0,62	0,75	0,48	0,19
Yb	1,50	5,6	6,8	3,61	3,46	5,0	7,2	3,90	4,18	4,14	5,1	3,12	1,3
Lu	0,25	0,92	1,13	0,53	0,50	0,80	1,14	0,57	0,61	0,60	0,80	0,47	0,23

Примечание. Окислы – в мас. %, элементы – в г/т; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\* – общее железо; к.а.п. – коэффициент апатитности.

Подготовка образцов для определения величин δ<sup>18</sup>O проводилась лазерным фторированием в присутствии реагента BrF<sub>5</sub> по методу, опубликованному в работе [Kuzmin, Yarmolyuk, Kravchinsky, 2010]. В комплект аппаратуры входила установка MIR 10–30 системы нагрева лазером CO<sub>2</sub> мощностью 100 Вт и длиной волны 10,6 мкм, позволяющим разогревать анализируемые минералы до 1000°C, а также вакуумная магистраль для очистки выделенного кислорода и окончательного его концентрирования. Расчеты δ<sup>18</sup>O были выполнены относительно международных стандартов NBS-28 (кварц) и NBS-30 (биотит). Внутренний контроль осуществлялся регулярными измерениями UWG-2 (гранат), а также внутреннего стандарта ГИ-1

(кварц) и лабораторного ИГЕМ РАН Polaris (кварц). Погрешность полученных значений величин δ<sup>18</sup>O находилась на уровне (1σ) ± 0,2‰.

Изотопные измерения стронция и неодима (табл. 2) выполнены в ЦКП ИНЦ СО РАН Байкальского аналитического центра на многоколлекторном масс-спектрометре Finnigan MAT-262 с использованием активатора Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·nH<sub>2</sub>O в смеси кислот HF : HNO<sub>3</sub> : H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (1 : 1 : 1) [Ярмолук, Кузьмин, Воронцов, 2013]. Для контроля использованы стандарты ВНИИМ-Sr (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr = 0,70801±20) и INd-1 (<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd = 0,5121003±104). Для измеренных партий проб получены значения <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr = 0,70802 ± 1; <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd = 0,512115 ± 10.

Таблица 2

Изотопный состав стронция и неодима в базальтоидах девонских вулканических ассоциаций Батеневского поднятия

Table 2

Sr–Nd isotopic composition of basaltoids of devonian volcanic assemblages of Batenevo Rise

Порода	Базальт	Базальт	Базальт	Базальт	Базальт
Индекс	БАТ1/6	БАТ 3/5	БАТ 3/23	БАТ 4/11	БАТ 4/13
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0,704752	0,705120	0,704850	0,705772	0,705607
$\pm 2\sigma$	0,000015	0,000016	0,000015	0,000013	0,000015
$\varepsilon \text{ Sr}(395)$	7,0	5,7	6,0	7,0	8,0
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0,512662	0,512663	0,512691	0,512597	0,512635
$\pm 2\sigma$	0,000006	0,000004	0,000007	0,000007	0,000005
$\varepsilon \text{ Nd}(395)$	3,7	4,5	4,7	3,4	4,0

Величины  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  и  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  рассчитаны из концентраций Rb, Sr, Sm и Nd, определенных методом ICP-MS. Значения  $\varepsilon \text{ Nd}$  и  $\varepsilon \text{ Sr}$  вычислялись относительно модельного хондритового резервуара CHUR с параметрами  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,512638$ ;  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0,1967$ ;  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} = 0,7045$ ;  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,0816$  [Ярмолук, Коваленко, 2003].

$^{40}\text{Ar}$ – $^{39}\text{Ar}$  изотопно-геохронологические исследования проводились на оборудовании ИГМ СО РАН по методике, которая описана в работе [Травин и др., 2009].

#### Строение вулканического поля Батеневского поднятия

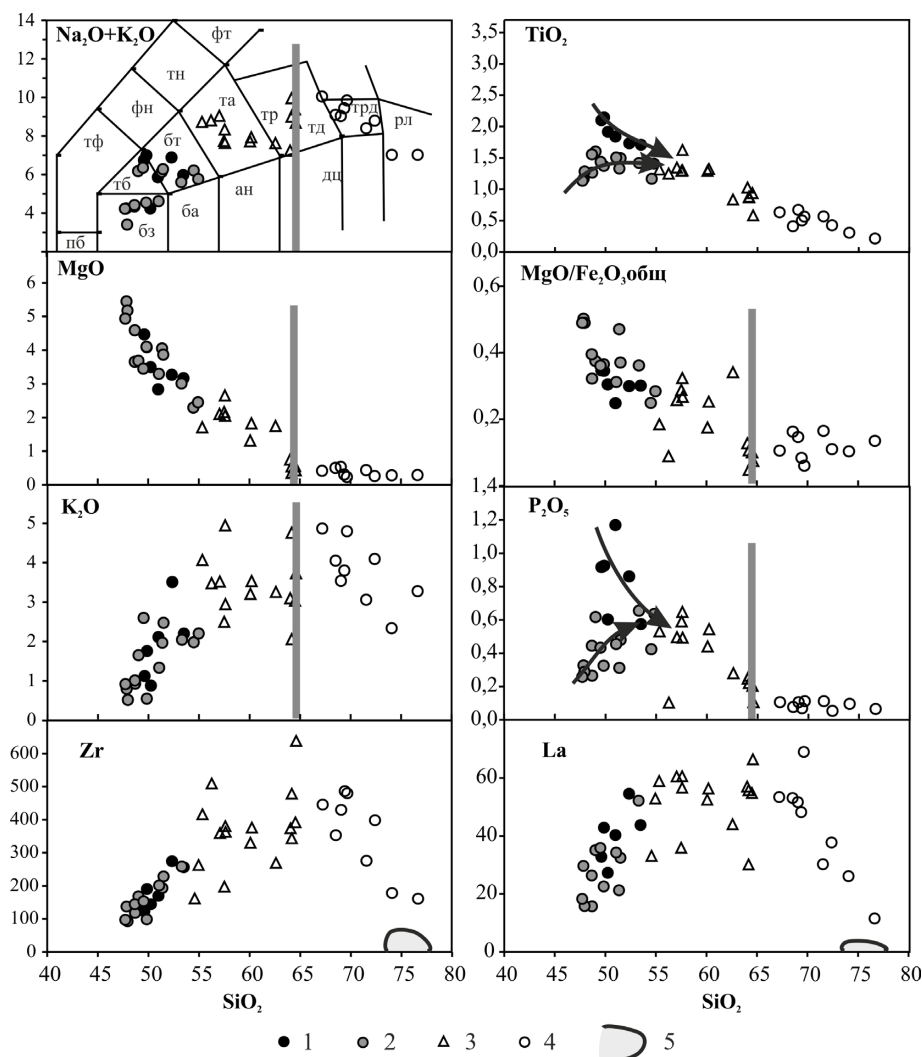
Батеневское поднятие, являющееся восточным отрогом Кузнецкого Алатау, в сочетании с Беллыкским поднятием Восточного Саяна разделяет две крупные впадины Минусинского прогиба – Чебаково-Балахтинскую и Сыда-Ербинскую. Вулканические породы сохранились на восточном фланге поднятия, где распространены на площади более 600 кв. км. Вулканическая толща имеет суммарную мощность до 700 м и с угловым несогласием залегает на кембро-ордовикском фундаменте. В свою очередь она перекрывается с размывом осадочными отложениями живетского яруса [Луицкий, 1960, Ратанов, 1974]. Строение толщи можно разделить на три серии потоков. Нижнюю серию образуют потоки афировых стекловатых и мелкозернистых базальтов и базальтовых трахиандезитов. Лавы перемежаются с туфами, туфобрекчиями и туфолавами, песчаниками и алевролитами (с растительными остатками), конгломератами, реже известняками. Отдельные лавовые потоки выделяются в рельефе куэстами, высота которых позволяет оценить мощность потоков в пределах 5–15 м. Среднюю серию потоков составляют породы широкого диапазона составов: базальты, трахиандезиты и более редкие трахиты и трахидациты, слагающие потоки мощностью 5–20 м. В этой серии лав отмечаются маломощные (0,5–2 м) прослои и линзы красноцветных песчаников, алевролитов и известняков. Верхнюю часть разрезов

толщи, вскрытую в центральной части вулканического поля, слагают субгоризонтальные тела риолитов и трахидацитов, местами разделенные небольшими выходами базальтов. На разных стратиграфических уровнях распространены силлы долеритов. В строении разрезов рассматриваемой части Батеневского поднятия объемы пород сокращаются с ростом кремнекислотности. Так, на долю пород основного состава приходится около 50% общего объема, на долю трахиандезитов ~ 35%, трахитов и трахидацитов ~ 10%, трахириодацитов и риолитов ~ 5%.

#### Тренды изменения составов пород Батеневского поднятия

На петрохимических диаграммах (рис. 1), на которых в качестве индекса дифференциации взяты содержания  $\text{SiO}_2$ , породы комплекса связаны между собой эволюционными зависимостями с изменениями трендов распределения точек составов при значении 64,5 мас. %  $\text{SiO}_2$ . Этот перегиб, как будет показано ниже, важен для понимания механизмов формирования всей магматической ассоциации.

Выделяются две группы пород в интервале составов от 47,7 до 55 мас. %  $\text{SiO}_2$ . Одна представлена умеренно-высокотитанистыми разновидностями, относительно обогащенными  $\text{P}_2\text{O}_5$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}$ , другая – низкотитанистыми, обедненными этими компонентами, но относительно обогащенными  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{CaO}$ . На графиках фигуративные точки составов этих групп формируют два тренда, очевидно, отвечающих разным путям фракционирования. Эволюция расплавов умеренно-высокотитанистых базальтоидов очевидно происходила при фракционировании апатита, титаномагнетита и оливина. В результате в расплаве снижалось содержание  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}$ ,  $\text{MgO}/\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}$  при росте  $\text{SiO}_2$  (от 49,6 до 54 мас. %) и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (от 14,8 до 16,2 мас. %). Низкотитанистые расплавы, очевидно, эволюционировали в результате фракционирования оливина и плагиоклаза, что вело к понижению в них содержаний  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}$ ,  $\text{MgO}/\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на фоне накопления Ti и P.



**Рис. 1. Распределение петрогенных окислов (мас. %) и редких элементов (г/т) относительно  $\text{SiO}_2$  (мас. %) в вулканической ассоциации на Батеневском поднятии**

1–4: породы вулканической ассоциации на Батеневском поднятии (1, 2 – базальты, долериты, трахибазальты и низкокремнистые базальтовые трахиандезиты; 1 – умеренно-высокотитанистые, 2 – низкотитанистые, 3 – базальтовые трахиандезиты, трахиандезиты и трахиты, 4 – трахидацииты и риолиты); 5 – поле составов анатектических гранитоидов по [Литвиновский и др., 2005]. TAS классификация по [Петрографический кодекс... 2009], названия полей: пб – пикробазальты, бз – базальты, ба – базальтовые андезиты, ан – андезиты, дц – дациты, рл – риолиты, тб – трахибазальты, бт – базальтовые трахиандезиты, та – трахиандезиты, тд – трахидацииты, тф – тефриты, фн – фенотефриты, тн – тефрифенолиты, фт – фенолиты. Вертикальная линия разделяет составы пород с базальт-трахитовым и трахидациит-риолитовым трендами эволюции. Стрелки отражают направление изменения составов расплавов базальтов с разными содержаниями  $\text{TiO}_2$

**Fig. 1. Distribution of petrogenetic oxides (wt %) and rare elements (ppm) in relation to  $\text{SiO}_2$  (wt %) of volcanic assemblage of Batenevo Rise**

1–4: volcanic assemblage rocks at Batenevo rise (1, 2 – basalts, dolerites, trachybasalts and low-silicon basaltic trachyandesites; 1 – medium-high-titanian, 2 – low-titanian, 3 – basaltic trachyandesites, trachyandesites and trachytes, 4 – trachydacites and rhyolites); 5 – anatectic granitoids field according to [Litvinovskiy et al., 2005]. TAS classification is given by [Петрографический кодекс... 2009], names of the fields are: пб – picobasalts, бз – basalts, ба – basaltic andesites, ан – andesites, дц – dacites, рл – rhyolites, тб – trachybasalts, бт – basaltic trachyandesites, та – trachyandesites, тд – trachydacites, тф – tephrites, фн – phonotephrites, тн – tephriphonolites, фт – phonolites. Vertical bar partitions compositions of rocks with basalt-trachytic and trachydacite-rhyolitic evolution trends. Arrows show trends of composition changes of basaltic melts with various  $\text{TiO}_2$  contents

На уровне составов трахиандезитов (55 мас. %  $\text{SiO}_2$ ) обе группы породообразующих расплавов приобретают общие характеристики. Последующая их эволюция до трахитовых составов (64,5 мас. %  $\text{SiO}_2$ ) протекала согласованно и вела к уменьшению в расплавах содержаний  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}$  и к ро-

сту  $\text{K}_2\text{O}$ . Смена составов, очевидно, протекала в соответствии с боузовским трендом кристаллизации минералов и контролировалась фракционированием титаномагнетита, апатита и магнезиально-железистых темноцветных силикатов. Составы трахитов лежат на продолжении указанного тренда. Однако в

них с ростом содержания  $\text{SiO}_2$  до 65 мас. % возрастает дисперсия содержаний ряда петрогенных окислов и редких элементов. Вариации окислов составляют (в мас. %): суммы щелочей от 7,2 до 10,0 (в том числе  $\text{K}_2\text{O}$  – от 2 до 4,8),  $\text{TiO}_2$  – от 0,58 до 1,03,  $\text{P}_2\text{O}_5$  – от 0,11 до 0,27,  $\text{CaO}$  – от 1,1 до 3,1,  $\text{MgO}$  – от 0,44 до 1,75,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – от 14,4 до 16,4.

Составы пород группы трахириодациты – риолиты образуют свой тренд. Породы этого тренда, наиболее близкие по составу к предельным трахитам, отличаются от последних минимальными содержаниями  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , которые с ростом  $\text{SiO}_2$  остаются более или менее постоянными. Отличает этот тренд также то, что с ростом  $\text{SiO}_2$  в породах снижаются содержания щелочных элементов и глинозема, а величина  $\text{MgO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$  приобретает тенденции к росту. Эти отличия указывают на то, что кислые вулканы имеют свои закономерности развития, отличающие их от продуктов последовательной дифференциации базальтовых магм.

Более выразительно различные тренды изменения составов в породах Батеневского поднятия прослеживаются на графиках распределения редких элементов относительно кремнезема. Так, базальт-трахитовый ряд составов характеризуется прямой корреляцией между содержаниями несовместимых элементов ( $\text{La}$ ,  $\text{Yb}$ ,  $\text{Y}$ ,  $\text{Rb}$ ,  $\text{Zr}$ ) и  $\text{SiO}_2$ , что типично для последовательно дифференцированных магматических серий. Этот тренд нарушается в трахитах при значениях  $\text{SiO}_2$  около 63–65 мас. %. Принципиально иное поведение элементов демонстрируют составы трахириодацитов и риолитов. В них отмечаются обратные соотношения между содержаниями редких элементов и содержанием  $\text{SiO}_2$ , что подтверждает отмеченные выше закономерности распределения порообразующих элементов. Следует отметить, что пограничная зона между этими двумя разными трендами ( $\text{SiO}_2 \sim 65$  мас. %) выделяется наиболее широким разбросом содержаний как петрогенных, так и несовместимых элементов, что, по видимому, отражает механизмы взаимодействия трахитовых расплавов с расплавами трахидацит-риолитового ряда.

### Магматические источники

Анализ геохимических данных свидетельствует о разных механизмах образования магм, участвовавших в формировании базальт-трахиандезит-трахитового и трахириодацит-риолитового рядов пород, слагающих дифференцированную ассоциацию Батеневского поднятия. Можно полагать, что различие в составе соответствующих им пород прямо связано с различными источниками материнских расплавов. Один из них, несомненно, отвечал источнику основ-

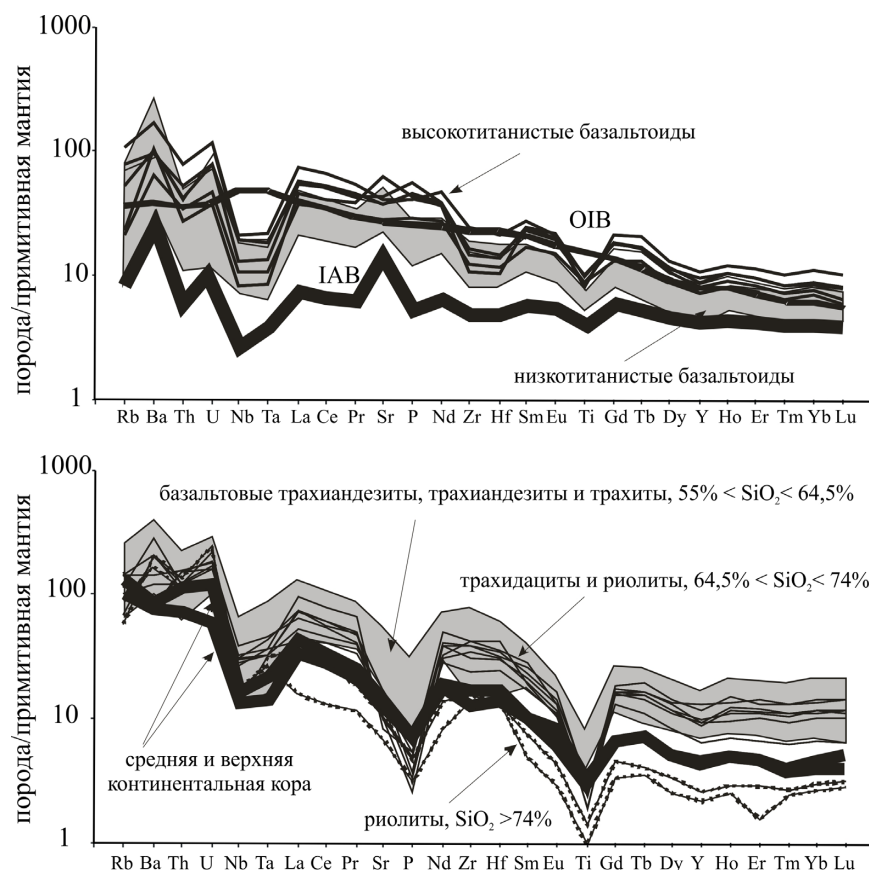
ных пород и их дифференциатов, другой контролировал образование кислых пород.

Все основные породы на Батеневском поднятии обогащены редкими литофильными, в том числе редкоземельными элементами по сравнению с базальтами островных дуг типа IAB (рис. 2). По содержанию  $\text{Rb}$ ,  $\text{Th}$ ,  $\text{U}$ , редкоземельных элементов ( $\text{REE}$ ),  $\text{Sr}$ ,  $\text{P}$  они близки к составу базальтов типа OIB. В то же время от последних они отличаются более низкими содержаниями высокозарядных элементов  $\text{Nb}$ ,  $\text{Ta}$  по отношению к  $\text{La}$  (среднее  $(\text{Ta}/\text{La})_n \sim 0,33$ ), в меньшей степени –  $\text{Zr}$ ,  $\text{Hf}$  и  $\text{Ti}$ , а также повышенными содержаниями  $\text{Ba}$  и  $\text{Sr}$ . Следует отметить различия геохимических характеристик низкотитанистых и умеренно-высокотитанистых базальтов. Первые из них относительно беднее практически всеми несовместимыми элементами, за исключением бария и стронция.

Трахиандезиты и трахиты Батеневского поднятия по сравнению с базальтами обладают более высокими содержаниями высокозарядных элементов  $\text{Th}$ ,  $\text{U}$ ,  $\text{Nb}$ ,  $\text{Ta}$ ,  $\text{Zr}$ ,  $\text{Hf}$ . С ростом содержания  $\text{SiO}_2$  породы обогащаются  $\text{Rb}$ , легкими редкоземельными элементами относительно тяжелых (значение  $(\text{La}/\text{Yb})_n$  достигает 7,65), в них проявляется дефицит  $\text{P}$  и  $\text{Ti}$ ,  $\text{Sr}$  и  $\text{Eu}$ .

Все это указывает на ведущую роль кристаллизационной дифференциации и, в частности, на фракционирование плагиоклаза при образовании этих пород. Риолиты ( $\text{SiO}_2 > 74$  мас. %) обеднены несовместимыми элементами. В этом отношении они близки к среднему составу верхней континентальной коры, от которой отличаются более низкими содержаниями фосфора, титана и тяжелых редких земель. По сравнению с ними трахириодациты ( $\text{SiO}_2$  от 65 до 74 мас. %) обогащены практически по всему спектру несовместимых элементов. Содержания последних растут в них с уменьшением  $\text{SiO}_2$ , и в целом эта группа кислых вулканических пород приближается по геохимическим характеристикам к трахитам, отличаясь от них более низкими содержаниями фосфора и титана.

Для характеристики источников магматизма и рассмотрения возможности их взаимодействия при образовании вулканической серии была использована система канонических отношений несовместимых элементов [Коваленко и др., 2007]. На графиках распределения отдельных элементов, а также их парных отношений (рис. 3) составы пород Батеневского поднятия выстраиваются в последовательность, претерпевающую излом на составах трахитов. На графиках типа  $\text{Th}/\text{La} - \text{Zr}$  ( $\text{La}$ ,  $\text{Th}$ ,  $\text{Ta}$ ) рост содержания отдельных элементов в ряду базальт – трахит следует рассматривать прежде всего как результат фракционирования. Одновременный рост  $\text{Th}/\text{La}$  означает, что процессы фракционирования сопровождались контаминацией продуктов дифференциации коровым веществом.



**Рис. 2. Спайдер-диаграммы для пород вулканической ассоциации на Батеневском поднятии**

Составы базальтов океанических островов OIB по [Rudnick, Gao, 2003], базальтов островных дуг IAB по [Birk, Allegre, 1978], средней и верхней континентальной коры по [Sharp, 1990]

**Fig. 2. Spidergrams for the Batenevo Rise volcanic assemblage rocks**

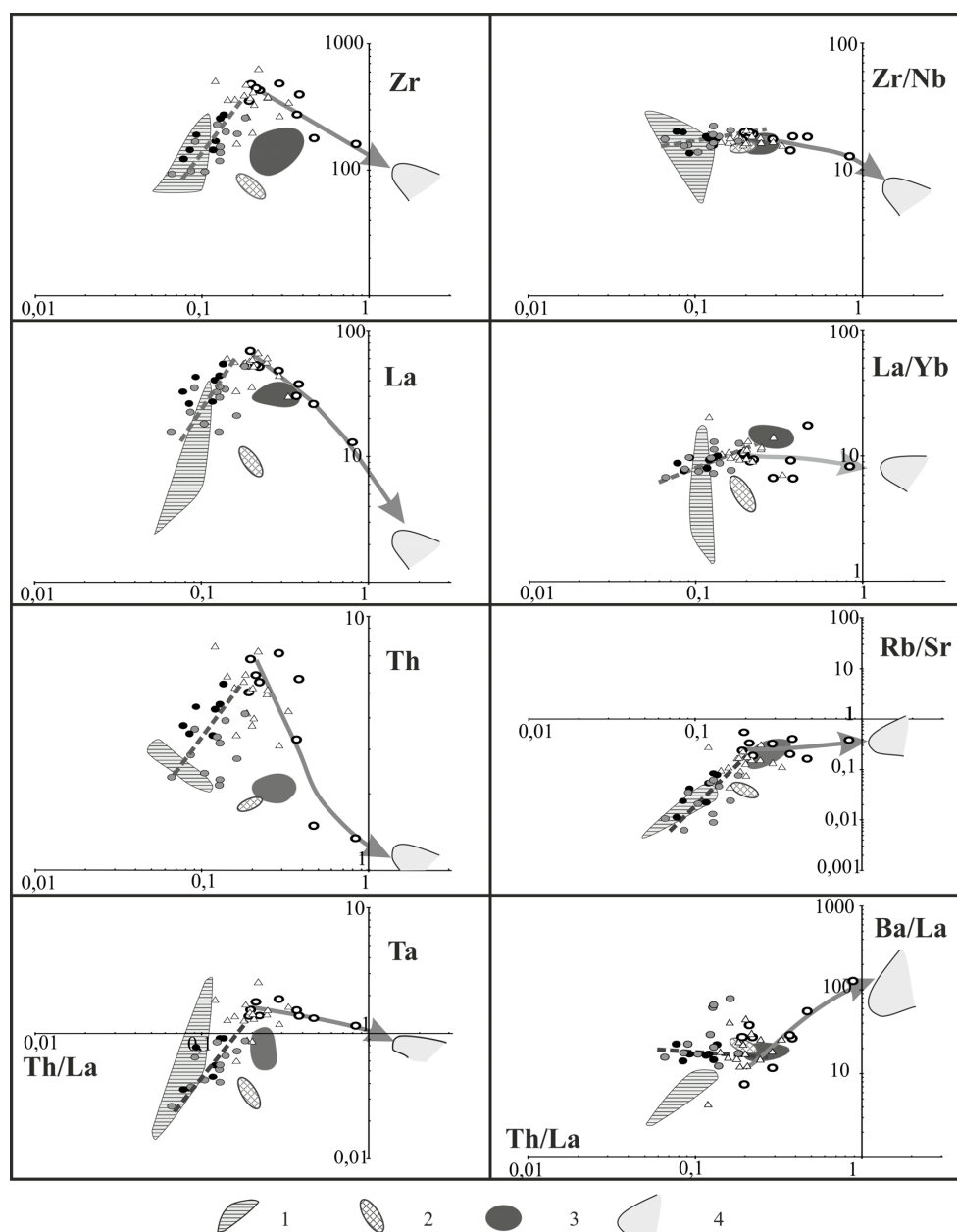
Oceanic island basalts (OIB) compositions are given by [Rudnick, Gao, 2003], island arc basalts (IAB) compositions are given by [Birk, Allegre, 1978], middle and upper continental crust compositions are given by [Sharp, 1990]

Составы базальтов Батеневской ассоциации, особенно умеренно-высокотитанистых базальтов, в основном лежат в поле значений, характерных для источников подлитосферной мантии. Некоторая часть составов низкотитанистых базальтов прослеживается в сторону составов коры и IAB. В еще большей степени в сторону коровых источников смещены трахиандезиты и трахиты. При этом амплитуда смещения коррелирует с ростом содержания  $\text{SiO}_2$  в породах. Выявленные закономерности поведения несовместимых элементов, а также их парных отношений в ряду базальты – трахиты, очевидно, следует связывать с фракционированием базальтовых расплавов во внутрикоровых камерах при одновременной контаминации продуктов дифференциации коровым веществом.

Что касается группы кислых пород, объединяющей трахириодациты и риолиты, то на графиках типа  $\text{Th/La} - \text{Zr(Th)}$  распределение их составов подчиняется обратной корреляционной зависимости, определяющей уменьшение содержаний несовместимых элементов (в том числе REE относитель-

но  $\text{Th}$ ) с ростом  $\text{SiO}_2$ . Соответствующий тренд прослеживается из области значений, свойственных трахитам, в область значений анатектических коровых гранитов, в качестве эталона которых взяты анатектические гранит-пегматиты Западного Забайкалья [Литвиновский и др., 2005]. На диаграммах корреляции парных отношений несовместимых элементов трахириодациты целиком сосредоточены в поле значений, типичных для континентальной коры, и имеют значительные перекрытия с составами трахитов. Высокремнистые риолиты смещены в сторону составов модельных анатектических гранитов и, соответственно, более высоких отношений  $\text{Th/La}$ .

Подобное поведение составов пород дифференцированной ассоциации Батеневского поднятия свидетельствует о двух ведущих источниках расплавов, принявших участие в ее образовании. Это прежде всего мантийные источники, определившие формирование дифференцированной серии базальт – трахиандезит – трахит, которое происходило с участием коровой контаминации.



**Рис. 3. Положение составов пород вулканической ассоциации на Батеневском поднятии на диаграммах парных отношений несовместимых элементов**

1 – поле составов мантийных источников (N-MORB, E-MORB, OIB) по [Rudnick, Gao, 2003]; 2 – поле средних составов базальтов островных дуг и активных континентальных окраин по [Birk, Allegre, 1978]; 3 – поле составов средней и верхней континентальной коры по [Sharp, 1990]; 4 – поле составов анатектических гранитоидов по [Литвиновский и др., 2005]; остальные см. рис. 1. Стрелками показаны тренды изменения составов расплавов в ряду базальты – трахиты (пунктирные) и в ряду трахириодациты – риолиты (сплошные)

**Fig. 3. Compositions of volcanic assemblage rocks from the Batenevo Rise at diagrams of incompatible elements pair ratios**

1 – field of mantle source compositions (N-MORB, E-MORB, OIB), according to [Rudnick, Gao, 2003]; 2 – field of average compositions of island arcs and active continental margins basalts, according to [Birk, Allegre, 1978]; 3 – field of middle and upper continental crust compositions, according to [Sharp, 1990]; 4 – field of anatectic granitoids compositions according to [Litvinovskiy et al., 2005]; for the other ones see fig. 1. Arrows point to trends of melts compositions changes within basalts – trachytes (stipple line) and trachyrhyodacites – rhyolites (full line) ranges

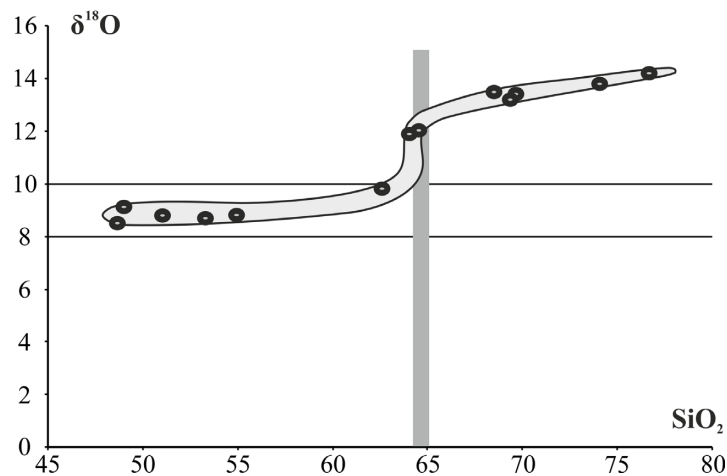
Источником анатектических риолитовых магм служила кора, взаимодействие которых с трахитовыми расплавами (крайними продуктами дифференциации мантийных магм) привело к образованию промежу-

точных продуктов – трахириодацитов. Этот вывод вполне согласуется с данными, полученными при изучении изотопного состава кислорода в полевых шпатах вулканических пород Батеневского поднятия (рис. 4).



Здесь также видны два тренда вариаций составов. Один из них отвечает ряду базальт – трахиандезит – трахит. Полевые шпаты базальтов и трахиандезитов и умеренно кислых трахитов имеют более или менее

стабильный изотопный состав кислорода и характеризуются значениями  $\delta^{18}\text{O} = 8,5\text{--}9,1\text{‰}$ , в целом типичными для плагиоклазов щелочно-габброидных интрузий региона [Покровский, 2000].



**Рис. 4. Вариации изотопного состава кислорода в полевых шпатах вулканитов Батеневского поднятия в зависимости от содержания  $\text{SiO}_2$  в материнских породах**

**Fig. 4. Isotopic composition of oxygen in feldspars from volcanites of the Batenevo Rise in dependence of  $\text{SiO}_2$  content in maternal rocks**

В полевых шпатах кислых трахитов изотопный состав кислорода резко возрастает от 9,8 до 12‰  $\delta^{18}\text{O}$  и затем в ряду трахит – трахириодацит – риолит последовательно растет до величины 14,2‰  $\delta^{18}\text{O}$  пропорционально с ростом содержания  $\text{SiO}_2$  в породах. Эти два тренда достаточно четко обрисовывают, во-первых, два крайних источника расплавов вулканической ассоциации: один, отвечающий составу базальтов ( $\delta^{18}\text{O} = 8,5\text{--}9,1\text{‰}$ ), и второй, соответствующий продукту корового плавления ( $\delta^{18}\text{O} = 14\text{‰}$ ); во-вторых, два разных направления эволюции соответствующих расплавов. Базальтовые магмы в основном были фракционированы до трахитовых составов при незначительных изменениях изотопной системы, тогда как анатектические расплавы смешивались с трахитовыми, формируя породы промежуточного изотопного состава. Необходимо отметить, что, как было показано выше, состав мантийного источника базальтов Батеневской ассоциации также был неоднороден. Его продуктами стали базальты с разными (повышенными и пониженными) содержаниями  $\text{TiO}_2$ , которые характеризовались разными трендами дифференциации при эволюции их до трахиандезитов.

Проведенные исследования изотопного состава Sr и Nd в базальтах этих двух групп подтвердили их вполне значимые различия (рис. 5).

В целом они попадают в поле изотопных составов вулканических пород Минусинских впадин. На Батеневском поднятии базальты с содержанием

$\text{TiO}_2 > 1,6$  мас. % характеризуются относительно более деплетированным составом ( $\epsilon\text{Nd}(395) = 4,5\text{--}4,7$  и  $\epsilon\text{Sr}(395) = 6,7\text{--}6$ ) по сравнению с низкотитанистыми базальтами ( $\epsilon\text{Nd}(395) = 3,4\text{--}4$  и  $\epsilon\text{Sr}(395) = 7\text{--}9$ ).

При сравнении с другими вулканическими ассоциациями Минусинского прогиба можно отметить, что участвующие в их строении базальты с повышенными содержаниями  $\text{TiO}_2$  в целом характеризуются более низкими содержаниями радиогенного стронция ( $\epsilon\text{Sr}(395) < 7$ ). Вероятно, обогащение базитов рифтовой области радиогенным стронцием отражает степень контаминации расплавов в источнике карбонатным веществом, субдуцированным в раннепалеозойский этап развития региона. Имеющиеся изотопные данные пока единичны, но, по-видимому, позволяют говорить о меньшей контаминации расплавов с повышенными содержаниями титана относительно расплавов низкотитанистых базитов.

#### Эволюция магматизма

Геологические и петрогеохимические данные свидетельствуют о направленном развитии магматизма в ходе формирования вулканической ассоциации Батеневского поднятия. Выделяются три этапа с разными сериями пород и составами их магматических источников.

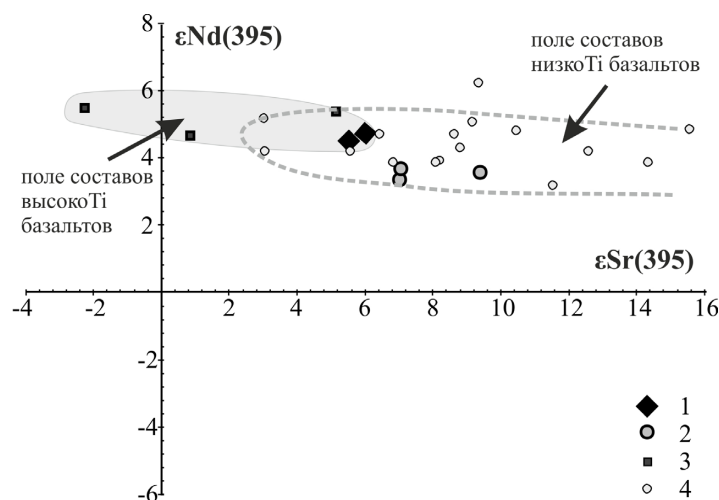
Для раннего этапа характерны абсолютное преобладание высокоглиноземистых базальтов с пони-



женным содержанием титана и спорадические проявления высокотитанистых базальтов.

Второй этап представлен вулканиитами, составы которых вверх по разрезу систематически обогаща-

лись содержанием  $\text{SiO}_2$ . На этом этапе формировалась гомодромная субщелочная серия, включающая в себя базальты, долериты, трахибазальты, базальтовые трахиандезиты, трахиандезиты и трахиты.



**Рис. 5. Изотопный состав базальтов Батеневского поднятия на диаграмме  $\epsilon\text{Sr}(t) - \epsilon\text{Nd}(t)$ , где  $t = 395$  млн лет**

1–2 – базальты Батеневского поднятия: 1 – умеренно-высокотитанистые базальты, 2 – низкотитанистые; 3–4 – базальты Минусинского прогиба по [Воронцов и др., 2013]: 3 – высокотитанистые, 4 – низкотитанистые

**Fig. 5. Isotopic composition of basalts of the Batenevo Rise at  $\epsilon\text{Sr}(t) - \epsilon\text{Nd}(t)$  diagram,  $t = 395$  Ma**

1–2 – Batenevo Rise basalts: 1 – medium-high-titanian basalts, 2 – low-titanian basalts; 3–4 – basalts of Minusinsk Basin, according to [Vorontsov et al., 2013]: 3 – high-titanian ones, 4 – low-titanian ones

Для пород типичны последовательное уменьшение содержаний  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , связанное с фракционированием темноцветных и рудных минералов, и накопление редких несовместимых элементов в наиболее кремнекислых трахитовых (62,6–64,5 мас. %  $\text{SiO}_2$ ) дифференциатах. Эта серия отражает дифференциацию материнских базальтовых магм в периферических очагах, в которых смешивались расплавы из разных мантийных источников. Один из них продуцировал низкотитанистые высокоглиноземистые расплавы, обедненные высокозарядными Nb, Ta, Zr, Hf, Th, U. Другой стал источником умеренно-высокотитанистых базальтов, которые отличались более высокими содержаниями HSE. Базальты обоих типов распространены по всей части этой дифференцированной серии пород, свидетельствуя об их совместном участии в ее образовании.

Заключительный этап связан с развитием трахидацит-риолитовой серии и продолжением эпизодического формирования низкотитанистых базальтов. По сравнению с трахитами базальт-трахитовой последовательности, породы трахидацит-риолитовой серии характеризуются более низкими содержаниями La, Rb, Yb, Zr, Nb, Ta, причем степень снижения последних растет пропорционально росту содержания  $\text{SiO}_2$ . Этим они отличаются от кислых производных дифференцированных базальт-трахириолит-комендитовых серий

Алтае-Саянской рифтовой области, которые характеризуются последовательным накоплением таких элементов вплоть до появления в них рудных концентраций [9]. Изменения составов в породах Батеневского поднятия связаны с разными механизмами их формирования. Дифференциация базитовых магм доходит только до трахитовых расплавов. Она прерывалась в результате появления в магматической системе анатектических кислых магм, которые взаимодействовали с трахитовыми расплавами, образуя промежуточные по геохимическим характеристикам продукты. Представления о смешении мантийных базальтовых и коровых кислых магм находят подтверждение в изотопном составе кислорода полевых шпатов, кристаллизовавшихся на всех этапах эволюции расплавов.

### Модель формирования дифференцированной серии

Как было показано ранее в работах [Воронцов и др., 2011; Воронцов и др., 2013], Минусинский прогиб сформировался в связи с процессами раннедевонского рифтогенеза, охватившими Алтае-Саянскую область, которая в это время представляла пассивную окраину Сибирского континента. В результате в регионе во внутриплитных условиях возникла система грабенов и впадин, удаленная от края кон-

тинента более чем на 500 км. Это стало основанием для того, чтобы связать магматизм Алтае-Саянской рифтовой области и, в частности, Минусинских впадин с активностью мантийного плюма [Ярмолук и др., 2006]. Его участие в образовании дифференцированной вулканической серии Батеневского поднятия представляется в следующем виде.

Магмы мантийного плюма взаимодействовали с литосферной мантией региона, метасоматически переработанной и обогащенной водой в ходе раннепалеозойской (каледонской) аккреции [Фор, 1989; Kelemen et al., 2003; Гордиенко, 2006; Добрецов, Буслов, 2007; Руднев, 2010; Буслов, 2011; Метелкин и др., 2012; Владимиров и др., 2013]. Плавление последней, поэтому, дало продукты, близкие к тем, которые образуются в зонах субдукции, но обогащенные относительно последних по всему спектру несовместимых элементов. Такие высокоглиноземистые базальтовые магмы поступали на поверхность, но, кроме того, локализовались во внутрикоровых промежуточных камерах. В них расплавы дифференцировались до трахитовых составов при одновременной незначительной контаминации коровым материалом, что нашло отражение в геохимических характеристиках последовательных продуктов диф-

ференциации. Этап эволюции расплавов в периферических камерах зафиксирован продуктами второго этапа излияний. Одновременно с этими процессами под тепловым и флюидным воздействием базитовых и дифференцируемых магм происходили подплавление надкоровых участков магматических камер и накопление анатектических коровых расплавов. Последние взаимодействовали с дифференциатами базитовых магм, образуя в результате широкую гамму переходных разновидностей между трахитами и риолитами. После исчерпания исходно базитовых магм периферических камер анатектические расплавы поступали на поверхность в виде крупных экструзивных тел, завершая формирование вулканической серии. Все эти процессы протекали при тепловом и вещественном воздействии мантийного плюма, о чем свидетельствуют высокотитанистые базальты, проявления которых отмечаются на ранних – средних этапах эволюции магм в периоды формирования базальт-андезит-трахитовой ассоциации.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 16-05-00181) и Научной школы «Химическая геодинамика» НШ 9638.2016.5.*

## ЛИТЕРАТУРА

- Афонин В.П., Гуничева Т.Н., Пискунова Л.Ф. Рентгенофлуоресцентный силикатный анализ. Новосибирск : Наука, 1984. 228 с.
- Буслов М.М. Тектоника и геодинамика Центрально-Азиатского складчатого пояса: роль позднепалеозойских крупноамплитудных сдвигов // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 1. С. 66–90.
- Воронцов А.А., Федосеев Г.С., Андриященко С.В., Пахольченко Ю.А. Источники девонского магматизма Минусинского прогиба (по геохимическим и изотопным Sr-Nd характеристикам базитов) // Доклады Академии наук. 2011. Т. 441, № 4. С. 514–520.
- Воронцов А.А., Федосеев Г.С., Андриященко С.В. Девонский вулканизм Минусинской котловины Алтае-Саянской рифтовой области: геологические, геохимические, изотопные Sr-Nd характеристики и магматические источники // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 9. С. 1283–1313.
- Владимиров А.Г., Изох А.Э., Поляков Г.В., Бабин Г.А., Мехоношин А.С., Крук Н.Н., Хлестов В.В., Хромых С.В., Травин А.В., Юдин Д.С., Шелепаев Р.А., Кармышева И.В., Михеев Е.И. Габбро-гранитные интрузивные серии и их индикаторное значение для геодинамических реконструкций // Петрология. 2013. Т. 21, № 2. С. 177–201.
- Гордиенко И.В. Геодинамическая эволюция поздних байкалит и палеозойского складчатого обрамления юга Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2006. Т. 47, № 1. С. 53–70.
- Добрецов Н.Л., Буслов М.М. Позднекембрийско-ордовикская тектоника и геодинамика Центральной Азии // Геология и геофизика. 2007. Т. 48, № 1. С. 93–108.
- Коваленко В.И., Наумов В.Б., Гирнис А.В., Дорофеева В.А., Ярмолук В.В. Средние составы магм и мантии срединно-океанических хребтов и внутриплитных океанических и континентальных обстановок по данным изучения расплавных включений и закалочных стекол базальтов // Петрология. 2007. Т. 15, № 5. С. 361–396.
- Литвиновский Б.А., Ярмолук В.В., Занвилевич А.Н., Шадаев М.Г., Никифоров А.В., Посохов В.Ф. Источники и условия формирования гранитных пегматитов Ошурковского щелочно-монзонитового массива, Забайкалье // Геохимия. 2005. № 12. С. 1251–1270.
- Лучицкий И.В. Вулканизм и тектоника девонских впадин Минусинского межгорного прогиба. М. : Изд-во АН СССР, 1960. 276 с.
- Метелкин Д.В., Верниковский В.А., Казанский А.Ю. Тектоническая эволюция Сибирского палеоконтинента от неопротерозоя до позднего мезозоя: палеомагнитная запись и реконструкции // Геология и геофизика. 2012. Т. 53, № 7. С. 883–899.
- Петрографический кодекс. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. СПб. : Изд-во ВСЕГЕИ, 2009. 194 с.
- Покровский Б.Г. Коровая контаминация мантийных магм по данным изотопной геохимии. М. : Наука, 2000. 226 с.
- Ратанов Л.С. Строение и история формирования девонского осадочно-вулканогенного комплекса Минусинского прогиба : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Томск, 1974. 22 с.
- Руднев С.Н. Раннепалеозойский гранитоидный магматизм Алтае-Саянской складчатой области : автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Новосибирск, 2010. 32 с.

Травин А.В., Юдин Д.С., Владимиров А.Г., Хромых С.В., Волкова Н.И., Мехоношин А.С., Колотилина Т.Б. Термохронология Чернорудской гранулитовой зоны (Ольхонский регион, Западное Прибайкалье) // Геохимия. 2009. Т. 50, № 11. С. 1181–1199.

Ярмолюк В.В., Коваленко В.И. Глубинная геодинамика, мантийные плюмы и их роль в формировании Центрально-Азиатского складчатого пояса // Петрология. 2003. Т. 11, № 6. С. 556–586.

Фор Г. Основы изотопной геологии. М.: Мир, 1989. 589 с.

Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Ковач В.П., Рыцк Е.Ю., Козаков И.К., Котов А.Б., Сальникова Е.Б. Ранние стадии формирования Палеоазиатского океана: результаты геохронологических, изотопных и геохимических исследований позднерифейских и венд-кембрийских комплексов Центрально-Азиатского складчатого пояса // Доклады Академии наук. 2006. Т. 410, № 5. С. 657–663.

Ярмолюк В.В., Кузьмин М.И., Воронцов А.А. Конвергентные границы западно-тихоокеанского типа и их роль в формировании Центрально-Азиатского складчатого пояса // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 12. С. 1831–1850.

Birk J. L., Allegre C.J. Chronology and chemical history of the parent body of basaltic achondrites studied by the  $^{87}\text{Rb}$ – $^{86}\text{Sr}$  method // Earth Planet Sci. Lett. 1978. V. 39, № 1. P. 37–51.

Kelemen P.B., Hanghøj K., Greene A.R. One View of the Geochemistry of Subduction-related Magmatic Arcs, with an Emphasis on Primitive Andesite and Lower Crust // Treatise on Geochemistry / executive editors H.D. Holland, K.K. Turekian. Elsevier Ltd., 2003. V. 3.18. P. 594–649.

Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., Kravchinsky V.A. Phanerozoic hot spot traces and paleogeographic reconstructions of the Siberian continent based on interaction with the African large low shear velocity province // Earth-Science Reviews. 2010. V. 102. P. 29–59.

Sharp Z.D. A laser-based microanalytical method for the in situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1990. V. 54. P. 1353–1357.

Rudnick R.L., Gao S. Composition of the Continental Crust // Treatise on Geochemistry / executive editors H.D. Holland, K.K. Turekian. Elsevier Ltd., 2003. V. 3.1. P. 1–56.

#### Авторы:

**Воронцов Александр Александрович**, доктор геолого-минералогических наук, заместитель директора по научной работе, зав. лабораторией геохимии основного и ультраосновного магматизма, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, профессор, кафедра полезных ископаемых, геологический факультет, Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия. E-mail: voront@igc.irk.ru

**Ярмолюк Владимир Викторович**, академик РАН, доктор геолого-минералогических наук, зав. лабораторией редкометалльного магматизма, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

*Geosphere Research*, 2017, 1, 16–27. DOI: 10.17223/25421379/2/3

A.A. Vorontsov<sup>1,2</sup>, V.V. Yarmolyuk<sup>3</sup>

<sup>1</sup> A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, SB RAS, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

<sup>3</sup> Institute of the Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry (IGEM), Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

#### GEOCHEMICAL AND ISOTOPE (O, Sr, Nd) EVIDENCE FOR INTERACTION OF MANTLE AND CRUSTAL MAGMAS IN BASALT-ANDESITE-TRACHYTE-RHYOLITE SERIES, BATENEVO RISE, MINUSA BASIN

The paper discusses the formation of the Early-Middle Devonian volcanic sequences of the Byskar Group of Batenevo Rise in the Minusa basin. The volcanic association includes the rocks of a wide compositional range from basalt to rhyolite. According to geological and petrochemical data the volcanic association of the Batenevo Rise displays a directed evolution of magmatism. Three stages demonstrating different rock series and different compositions of their magmatic sources have been identified.

The earlier stage demonstrates a predominance of high-alumina basalts with lower titanium content. It is also characterized by a sporadic occurrence of high-titanium basalts.

The second stage includes volcanics that are systematically SiO<sub>2</sub>-saturated in the upper sequence. The homodromic subalkaline series including basalts, dolerites, trachybasalts, basaltic trachyandesites and trachytes was formed during the second stage. This series reflects the differentiation of parental basaltic magmas in periphery chambers where the melts from different mantle sources were mixed. One of the sources produced low-titanium, high-alumina basalts, depleted in high-field strength elements Nb, Ta, Zr, Hf, Th, U. Another was a source for moderately-high titanium basalts that were different by higher HSE contents. The Sr and Nd isotope data obtained for basalts of these two groups also suggest the significant difference of their sources.

The final stage is related to trachyte-rhyolite series. As compared with trachyte's of the basalt-trachyte series the rocks from the trachyte-rhyolite series demonstrate lower La, Rb, Yb, Zr, Nb, Ta contents. Moreover, the degree of decrease of the latter increases proportionally to their SiO<sub>2</sub> growth.

Thus, changes in compositions of rocks of the Batenevo Rise are related to different mechanisms of their formation. The differentiation of basite magmas goes only to trachyte melts. It was interrupted as a result of occurrence of anatectic felsic magmas which interacted with trachyte melts in the magmatic system giving rise to products being intermediate by geochemical characteristics. The melting of mantle basalt and crustal felsic magmas is supported by oxygen isotope composition of feldspar crystallized at all stages of melt evolution.

**Keywords:** Minusa basin, Devonian volcanic sequences, differentiation of basite magma, magmatic sources.

## REFERENCES

- Afonin V.P., Gunicheva T.N., Piskunova L.F. *Rentgeno fluoressentnyy silikatnyy analiz* [X-ray fluorescence silicate analysis]. Novosibirsk: Nauka, 1984. 228 p. In Russian
- Buslov M.M. Tectonics and geodynamics of the Central Asian foldbelt: the role of Late Paleozoic large-amplitude strike-slip faults // *Russian Geology and Geophysics*. 2011. V. 52. № 1. pp. 52–71.
- Vorontsov A.A., Fedoseev G.S., Andryushchenko S.V., Pakhol'chenko Yu.A. Sources of Devonian magmatism in the Minusa trough based on geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of basites // *Doklady Earth Sciences*. 2011. V. 441. № 2. pp. 1649–1655.
- Vorontsov A.A., Fedoseev G.S., Andryushchenko S.V. Devonian volcanism in the Minusa basin in the Altai-Sayan area: geological, geochemical, and Sr–Nd isotopic characteristics of rocks // *Russian Geology and Geophysics*. 2013. V. 54. № 9. pp. 1283–1313.
- Vladimirov A.G., Izokh A.E., Polyakov G.V., Babin G.A., Mekhonoshin A.S., Kruk N.N., Khlestov V.V., Khromykh S.V., Travin A.V., Yudin D.S., Shelepaev R.A., Karmysheva I.V., Mikheev E.I. Gabbro-granite intrusive series and their indicator importance for geodynamic reconstructions // *Petrology*. 2013. V. 21. № 2. pp. 158–180.
- Gordienko I.V. Geodynamic evolution of Late Baikallides and Paleozooids in the folded periphery of the Siberian craton // *Russian Geology and Geophysics*. 2006. V. 47. № 1. pp. 51–67.
- Dobretsov N.L., Buslov M.M. Late Cambrian-Ordovician tectonics and geodynamics of Central Asia // *Russian Geology and Geophysics*. 2007. V. 48. № 1. pp. 71–82.
- Kovalenko V.I., Giris A.V., Yarmolyuk V.V., Naumov V.B., Dorofeeva V.A. Average compositions of magmas and mantle sources of mid-ocean ridges and intraplate oceanic and continental settings estimated from the data on melt inclusions and quenched glasses of basalts // *Petrology*. 2007. V. 15. № 4. pp. 335–368.
- Litvinovsky B.A., Zanzilevich A.N., Shadaev M.G., Posokhov V.F., Yarmolyuk V.V., Nikiforov A.V. Sources of material and genesis of granitic pegmatites of the Oshurkovskii alkaline monzonite Massif, Transbaikalia // *Geochemistry International*. 2005. № 12. pp. 1149–1167.
- Luchitskiy I.V. *Vulkanizm i tektonika devonskikh vpadin Minusinskogo mezhgornogo progiba* [Volcanism and tectonics of the Devonian basins of the Minusa intermountain basin]. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1960. 276 p. In Russian
- Metelkin D.V., Vernikovskiy V.A., Kazanskiy A.Yu. Tectonic evolution of the Siberian Palecontinent from the Neoproterozoic to the Late Mesozoic: paleomagnetic record and reconstructions // *Russian Geology and Geophysics*. 2012. V. 53. № 7. pp. 675–688.
- Petrograficheskii kodeks. Magmaticheskie, metamorficheskie, metasomaticheskie, impaktnye obrazovaniya* [Petrographic Code. Magmatic, metamorphic, metasomatic, impact formation]. St-Petersburg: Izd-vo VSEGEI. 2009. 194 p. In Russian
- Pokrovskiy B.G. *Korovaya kontaminatsiya mantiynykh magm po dannym izotopnoy geokhimii* [Crustal contamination of mantle magmas according to isotope geochemistry]. Moscow: Nauka, 2000. 226 p. In Russian
- Ratanov L.S. *Stroenie i istoriya formirovaniya devonskogo osadochno-vulkanogenogo kompleksa Minusinskogo progiba* [The structure and history of the formation of the Devonian sedimentary-volcanogenic complex of the Minusa basin] // Avtoref. dis. ... kand. geol.-min. nauk. Tomsk, 1974. 22 p. In Russian
- Rudnev S.N. *Rannepaleozoyskiy granitoidnyy magmatizm Altae-Sayanskoy skladchatoy oblasti* [Early Paleozoic granitoid magmatism of the Altai-Sayan folded region] // Avtoref. dis. ... doktora geol.-min. nauk. Novosibirsk, 2010. 32 p. In Russian
- Travin A.V., Yudin D.S., Vladimirov A.G., Khromykh S.V., Volkova N.I., Mekhonoshin A.S., Kolotilina T.B. Thermochronology of The Chernorud granulite zone, Ol'khon Region, Western Baikal Area // *Geochemistry International*. 2009. V. 47. № 11. pp. 1107–1124.
- Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I. Deep geodynamics and mantle plumes: their role in the formation of the Central Asian fold belt // *Petrology*. 2003. V. 11. № 6. pp. 504–531.
- For G. *Osnovy izotopnoy geologii* [Fundamentals of isotope geology]. Moscow: Mir. 1989. 589 p. In Russian
- Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I., Kovach V.P., Rytsk E.Yu., Kozakov I.K., Kotov A.B., Sal'nikova E.B. Early stages of the Paleasian Ocean formation: Results of geochronological, isotopic, and geochemical investigations of Late Riphean and Vendian-Cambrian complexes in the Central Asian Foldbelt // *Doklady Earth Sciences*. 2006. V. 411. № 8. pp. 1184–1189.
- Yarmolyuk V.V., Kuzmin M.I., Vorontsov A.A. West pacific-type convergent boundaries and their role in the formation of the Central Asian fold belt // *Russian Geology and Geophysics*. 2013. V. 54. № 12. pp. 1831–1850.
- Birk J.L., Allegre C.J. Chronology and chemical history of the parent body of basaltic achondrites studied by the  $^{87}\text{Rb}$ - $^{86}\text{Sr}$  method // *Earth Planet Sci. Lett.* 1978. V. 39. № 1. pp. 37–51.
- Kelemen P.B., Hanghøj K., Greene A.R. One View of the Geochemistry of Subduction-related Magmatic Arcs, with an Emphasis on Primitive Andesite and Lower Crust // *Treatise on Geochemistry*, Executive Editors Holland H.D., Turekian K.K. 2003, Elsevier Ltd. V. 3.18. pp. 594–649.
- Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., Kravchinsky V.A. Phanerozoic hot spot traces and paleogeographic reconstructions of the Siberian continent based on interaction with the African large low shear velocity province // *Earth-Science Reviews*. 2010. V. 102. pp. 29–59.
- Sharp Z.D. A laser-based microanalytical method for the in situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides: *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1990. V. 54. pp. 1353–1357.
- Rudnick R.L., Gao S. Composition of the Continental Crust // *Treatise on Geochemistry*, Executive Editors Holland H.D., Turekian K.K., Elsevier Ltd. 2003. V. 3.1. pp. 1–56.

## Author's:

**Vorontsov Aleksander A.**, Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Head of the Laboratory of Geochemistry of Basic and Ultrabasic Magmatism, A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Professor, Department of Minerals, Geological Faculty of the Irkutsk State University, Irkutsk, Russia. E-mail: voront@igc.irk.ru

**Yarmolyuk Vladimir V.**, Member of RAS, Head of the Laboratory of Rare Metal Magmatism, Institute of the Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Moscow, Russia