

УДК 552.2+550.4(571.513)

## ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И Sr-Nd ИЗОТОПНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕВОНСКИХ БАЗИТОВ КОПЬЕВСКОГО И НОВОСЕЛОВСКОГО ПОДНЯТИЙ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ МИНУСИНСКОГО ПРОГИБА

А.А. Воронцов, Г.С. Федосеев\*

Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск

E-mail: voron@igc.irk.ru

\*Новосибирский государственный университет

\*Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск

E-mail: fedoseev@uiggm.nsc.ru

Приведены данные о строении Копьевского и Новоселовского поднятий Чебаково-Балахтинской впадины Минусинского прогиба, рассмотрены геохимические и изотопные особенности базитов этих поднятий и предложена модель формирования источников исходных расплавов. По содержанию петрогенных элементов и редких литофильных элементов базиты сходны между собой, различаясь лишь по обогащенности тяжелыми редкими землями, Rb, Nb и Ta. Показано, что в сравнении с внутриплитовыми субщелочными базальтами типа OIB изученные базиты обеднены высокозарядными некогерентными элементами Nb, Ta, Zr, Hf, Ti и обогащены тяжелыми редкими землями, Ba и Sr. Предполагается ассимиляция расплавом типа PREMA карбонатного материала, приведшая к отклонению состава базитов от поля мантийной корреляции в сторону обогащения радиогенным стронцием.

### Ключевые слова:

Девонский магматизм, Алтае-Саянская рифтогенная система, геохимические и Sr-Nd изотопные характеристики базитов, магматические источники, геодинамическая обстановка.

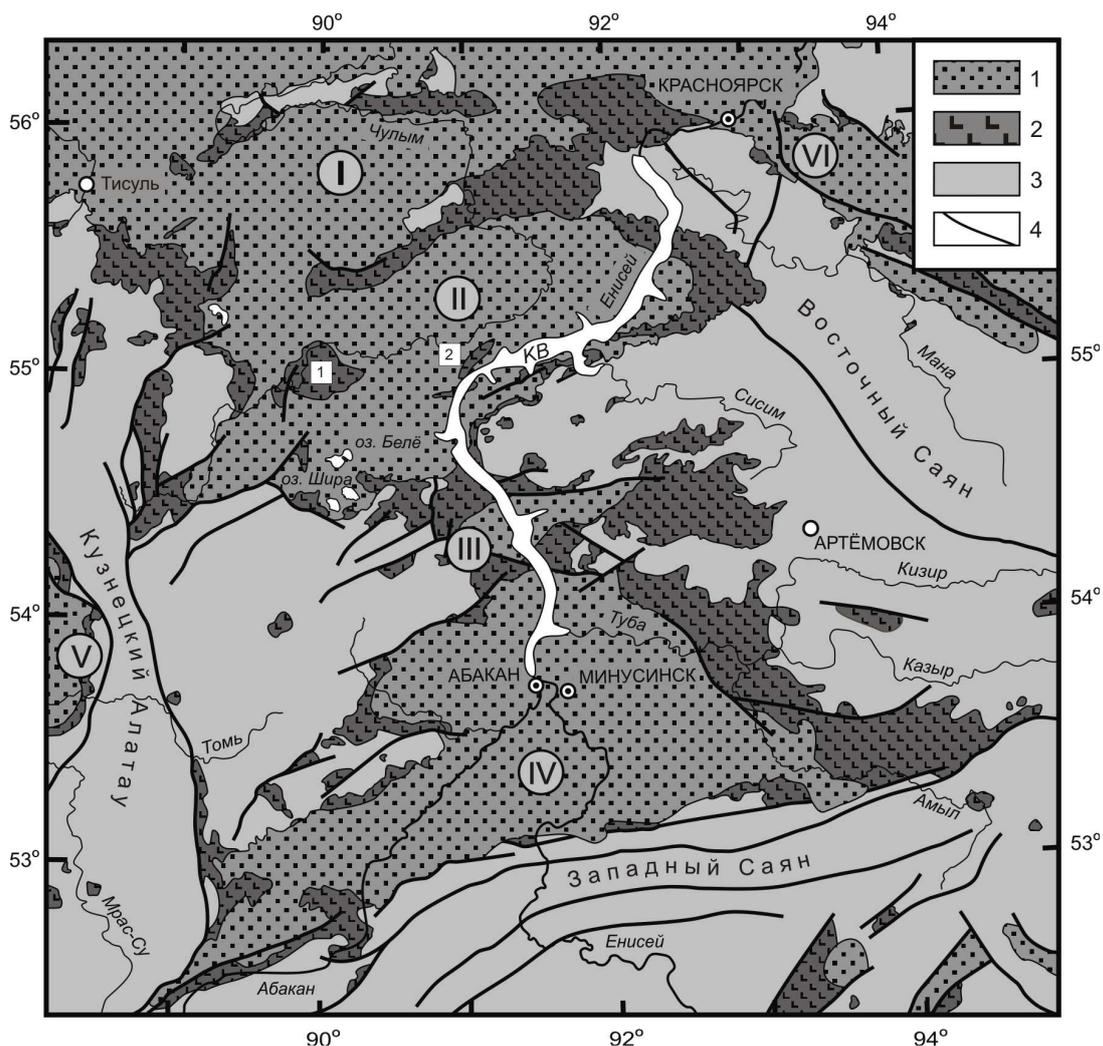
### Key words:

Devonian magmatism, Altay-Sayan rift system, geochemical and Sr-Nd isotope characteristics of mafic rocks, magmatic sources, geodynamic setting.

В истории образования каледонид юго-западного обрамления Сибирской платформы особую роль сыграла девонская эпоха, ознаменовавшаяся широкомасштабным проявлением вулканизма и формированием в пределах территории Алтая и Саян многочисленных прогибов и грабенов. В процессе многоплановых исследований геологов нескольких поколений было установлено сложное геологическое строение этих депрессий и неперенная приуроченность к тектоническим разломам. Это позволяет объединить разномасштабные структуры в единую Алтае-Саянскую рифтовую область (АСРО), обладающую рядом специфических особенностей, отличающих ее от классических рифтовых провинций [1]. Сходство обобщенных геологических разрезов и характера магматизма в разных сегментах рифтовой системы указывают на то, что АСРО могла сформироваться в результате фрагментации крупного внутриконтинентального бассейна, расположенного в тыловой части активной континентальной окраины, достигшей в раннем девоне субплатформенной стадии развития [2]. Одной из крупнейших структур АСРО является Минусинский прогиб, состоящий из нескольких впадин (Назаровская, Чебаково-Балахтинская, Минусинская и др.) общей площадью около 100 тыс. км<sup>2</sup> (рис. 1). Развитие отдельных впадин было тесно сопряжено с образованием девонских вулcano-плутонических ассоциаций, которые вскрываются по обрамлениям этих впадин и в антиклинальных складках – поднятиях, нередко приуроченных к их внутренним участкам. В Чебаково-Балахтинской впадине, например, насчитывается около десяти таких поднятий – Копьевское, Новоселовское, Кокоревское, Тонское и другие [3].

Специфику магматизма в Минусинском прогибе определяют базальтовые, базальт-андезибазальтовые, базальт-трахитовые, нефелинит-фонотефритовые, бимодальные базальт-трахириолит-комендитовые ассоциации с долеритами, тешенитами, тералитами и щелочными сиенитами. Большинство из них участвует в строении вулканогенно-осадочных толщ и объединяется в раннедевонскую осадочную серию, которая с несогласием залегает на кембро-ордовикских отложениях. Среди магматических пород преобладают субщелочные базиты. Однако их слабая и неравномерная изученность современными геохимическими и изотопными методами не позволяет корректно оценивать изменчивость составов магматических источников по площади рифтовой системы, что имеет большое значение при палеогеодинамических реконструкциях [4].

Копьевское поднятие находится в верховьях бассейна р. Чулым, в районе слияния рек Белый и Черный Июс (рис. 1, 2, а) и обнажено на площади более тысячи кв. км. Оно представляет собой изометричную антиклинальную структуру, сводовая часть и крылья которой сложены терригенно-вулканогенными отложениями быскарской серии. С угловым несогласием они залегают на кембро-ордовикском фундаменте, представленном зеленокаменно измененными эффузивами и серыми кремнистыми сланцами с прослоями метаморфизованных известняков и мергелей [5]. В данном разрезе серия разделена на коповскую и кагаевскую толщи. Копьевская толща (мощность до 1500 м) на 75 % состоит из покровов и силлов лабрадорских порфиринов (плагифириновых базальтов), перемежающихся с афировыми базальтами, андези- и трахибазальтами и с прослоями и пачками (мощно-

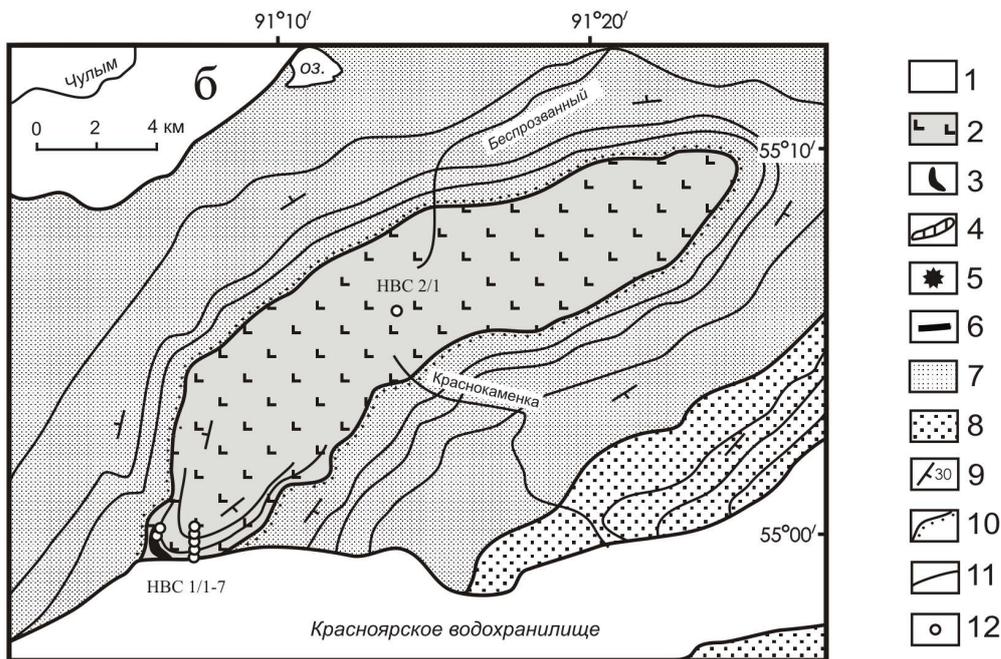
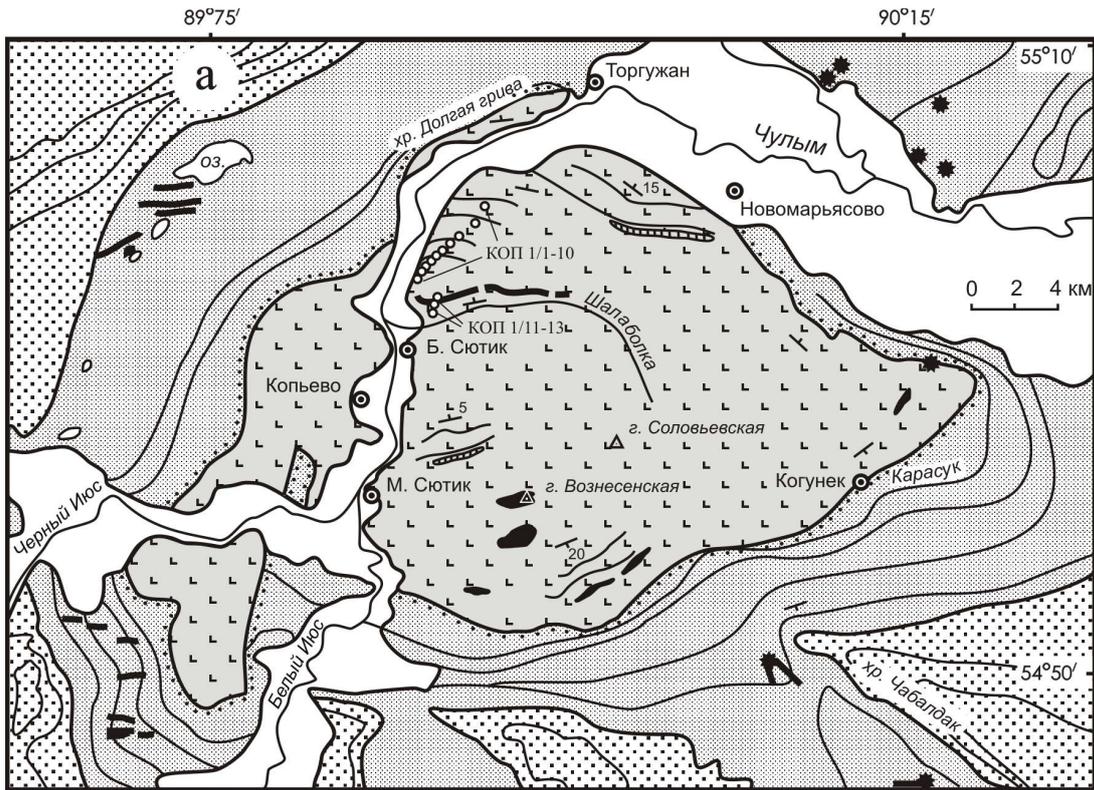


**Рис. 1.** Положение антиклинальных поднятий в Чебаково-Балахтинской впадине Минусинского прогиба: 1, 2 – осадочные и вулканогенно-осадочные отложения: 1 – покровные ( $D_2-C$ ), 2 – быскарской серии ( $D_1$ ); 3 – фундамент ( $E-O$ ), 4 – тектонические нарушения. Цифрами в кругах обозначены впадины: I – Назаровская, II – Чебаково-Балахтинская, III – Сыда-Ербинская, IV – Минусинская и прогибы: V – Кузнецкий, VI – Агульский. Цифрами в квадратах обозначены поднятия: 1 – Копьевское, 2 – Новоселовское. КВ – Красноярское водохранилище

стью до 40 м) туфобрекчий, лапиллиевых трахитовых туфов, вулканомиктовых песчаников, мергелей, известняков и валунных конгломератов. В известняках отмечены остатки флоры, в мергелях – пелелипод; некоторые разности известняков трактуются как травертины [6]. В основании перекрывающей кагаевской толщи располагаются покровы трахиандезитов, с прослоями туфов, вулканомиктовых песчаников, алевролитов и конгломератов. В ней установлены силлы долеритов, разделенные прослоями (мощностью до нескольких десятков метров) брекчиевидных известняков, доломитов, песчаников и туфобрекчий [6], а также немногочисленные дайки и экструзивные тела мелкозернистых трахитов и трахидацитов. Вверх по разрезу количество терригенных пород увеличивается – наряду с красноцветными игнимбритами, вулканомиктовыми конгломератами, гравелитами и песчаниками появляются зеленоцветные алевролиты.

**Новоселовское поднятие** расположено примерно в 30 км к востоку от Копьевского (рис. 1, 2, б) и имеет сходное с ним строение: толща мощностью более 800 м сложена в основном серией покровов пироксеновых и плагиоклазовых порфировых базальтов, которые в разрезах чередуются с афировыми базальтами и андезибазальтами и с редкими линзами туфобрекчий и красноцветных алевролитов [2]. К верхней части толщи приурочены трахитовые дайки.

Базиты рассматриваемых поднятий представлены афировыми и порфировидными базальтами и долеритами. В порфировидных разновидностях вкрапленники достигают 2 мм в поперечнике, составляют до 10...15 % объема пород и сложены оливином, авгитом и плагиоклазом, соотношения между которыми изменяются в широких пределах. Оливин замещается волокнисто-петельчатым боулингитом. Авгит, как правило, обладает хорошей сохранностью, в редких случаях в нем заметны зо-



**Рис. 2.** Схемы геологического строения Копьевского (а) и Новоселовского (б) поднятий: 1) четвертичные отложения; 2) девонские нерасчлененные магматиты основного состава; 3) девонские субвулканические трахиты и трахидациты; 4) базитовые силлы; 5) меловые базанитовые трубки взрыва; 6) меловые базанитовые дайки; 7) отложения среднего и позднего девона; 8) отложения раннего карбона; 9) элементы залегания; 10) стратиграфические несогласия; 11) направления напластования; 12) точки взятия проб

**Таблица 1.** Содержания петрогенных (мас. %), редких и редкоземельных элементов (г/т) в базитах Копьевского и Новоселовского поднятий

Компоненты	Номера проб											
	КОП 1/1	КОП 1/4	КОП 1/5	КОП 1/6	КОП 1/8	КОП 1/9	КОП 1/10	КОП 1/11	КОП 1/12	НВС 1/4	НВС 1/5	НВС 2/1
SiO <sub>2</sub>	47,58	48,25	47,84	46,93	47,47	46,35	49,50	47,50	51,55	51,98	51,21	46,9
TiO <sub>2</sub>	1,05	1,27	1,51	1,77	1,09	1,38	1,24	1,18	1,58	1,54	1,55	1,39
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,79	16,07	16,37	16,95	16,54	16,17	17,62	18,15	17,29	17,25	17,47	17,51
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> об.	10,07	9,98	11,09	11,25	9,30	10,04	9,37	10,13	11,56	8,52	8,44	10,06
MnO	0,16	0,20	0,18	0,41	0,24	0,12	0,17	0,15	0,13	0,28	0,42	0,16
MgO	9,26	6,46	6,62	5,79	7,09	7,19	5,20	6,17	2,80	3,56	3,69	5,11
CaO	9,63	8,39	8,41	8,19	9,83	8,95	8,91	8,22	5,65	4,77	4,80	9,93
Na <sub>2</sub> O	3,49	3,95	4,33	3,51	2,96	3,42	3,73	3,42	4,52	6,19	6,04	3,94
K <sub>2</sub> O	0,99	1,54	0,86	1,40	1,26	1,09	1,58	1,35	2,25	2,07	2,27	1,25
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,38	0,54	0,62	0,75	0,48	0,48	0,52	0,44	0,73	0,82	0,84	0,74
n.n.n.	1,73	3,57	2,36	3,21	3,54	4,96	2,15	3,23	2,03	2,88	3,21	2,83
Сумма*	100,29	100,40	100,37	100,34	100,27	100,33	100,28	100,14	100,33	100,17	100,21	100,02
Rb	17,9	25,4	4,9	12,9	11,6	7,0	14,3	12,7	21,1	24,5	24,9	22,2
Ba	483	685	1580	1452	4594	1793	3147	1571	1858	1270	1415	538
Sr	903	1079	1024	974	1139	866	1245	1245	1057	1500	1231	1329
Zr	173	276	284	287	188	187	221	137	291	291	382	206
Nb	10,7	15,5	17,8	15,8	12,3	11,0	14,8	8,2	20,6	21,5	26,1	14,5
Hf	3,6	5,3	5,3	5,3	3,7	3,7	4,2	2,8	5,7	5,6	7,0	4,1
Ta	0,60	0,90	0,96	0,89	0,67	0,63	0,82	0,45	1,22	1,01	1,47	0,72
Y	23,6	29,1	29,7	32,3	22,3	24,4	24,6	20,3	29,5	35,7	36,9	31,4
Th	3,5	6,7	3,1	2,1	3,0	1,9	3,3	2,1	4,9	4,1	5,7	2,1
U	2,13	2,65	1,68	1,10	1,71	0,89	1,89	1,20	1,64	2,47	2,71	1,34
La	28,66	52,30	41,69	40,26	31,92	27,06	38,23	26,85	45,72	46,79	55,24	32,09
Ce	64,2	115,9	90,9	91,7	70,6	62,7	82,9	60,2	100,1	103,7	120,8	78,5
Pr	7,4	13,7	10,5	10,8	8,1	7,5	9,5	7,2	11,6	11,1	13,7	8,5
Nd	32,9	60,2	44,3	47,4	35,2	33,3	40,1	31,5	49,4	45,7	57,8	35,4
Sm	6,36	11,18	8,69	9,35	6,67	6,79	7,57	6,05	9,01	8,41	10,73	7,70
Eu	1,90	3,04	2,48	2,66	1,95	1,99	2,19	1,85	2,42	3,18	3,00	2,80
Gd	6,15	9,54	8,11	8,82	6,16	6,55	6,97	5,69	8,26	7,83	10,01	7,10
Tb	0,84	1,19	1,11	1,19	0,83	0,91	0,93	0,75	1,10	1,05	1,36	0,91
Dy	5,09	6,67	6,54	7,20	4,88	5,42	5,46	4,47	6,48	5,89	8,06	5,66
Ho	1,04	1,26	1,29	1,40	0,95	1,06	1,06	0,86	1,29	1,21	1,57	1,02
Er	3,16	3,70	3,66	3,95	2,68	3,06	3,02	2,52	3,83	3,34	4,81	3,01
Tm	0,42	0,48	0,51	0,56	0,38	0,42	0,42	0,35	0,54	0,51	0,63	0,44
Yb	2,72	3,15	3,34	3,69	2,57	2,73	2,73	2,30	3,60	3,26	4,24	2,90
Lu	0,42	0,48	0,52	0,55	0,39	0,41	0,43	0,36	0,56	0,49	0,64	0,43

Примечание: Петрогенные элементы определены рентгенофлуоресцентным методом в ИГХ СО РАН, микроэлементы – методом ICP-MS в Аналитическом центре коллективного пользования ИНЦ СО РАН (пробоподготовка: сплавление с метаборатом лития).

нальность и структура песочных часов. Плагноклаз образует удлиненно-таблитчатые кристаллы и отвечает по составу лабрадору. Основная масса состоит из пироксена, плагноклаза и продуктов их изменения. Пироксен замещается хлоритом, что сопровождается развитием эпидота, карбонатов и пренинта; плагноклаз альбитизируется и замещается тонкочешуйчатым мусковитом. Основная масса имеет тонкозернистую пойкилоофитовую структуры с

элементами трахитоидности и пятнистую окраску, определяемую разной степенью раскристаллизации. Изменение окраски происходит даже в пределах одного шлифа – менее раскристаллизованные участки имеют темную с коричневым оттенком окраску, а более раскристаллизованные – светлую. Редкие мелкие поры (до 1 мм в поперечнике) выполнены хлоритом, цеолитами, халцедоном или опалом, насыщенным пылевидными включениями

хлорита. Акцессорные минералы представлены гематитом, единичными зёрнами магнетита и повсеместно развитым тонкоигольчатым апатитом. Иногда встречаются глубоко измененные разности базитов, содержание гематита в которых повышается до 15 %.

Базальты и долериты являются ведущей разновидностью пород, участвующих в строении магматических ассоциаций. Такие породы близки по составу к исходным расплавам, что позволяет оценить составы источников магматизма. Содержание  $\text{SiO}_2$  в них изменяется в интервале от 46,4 до 52,0 мас. %, суммарное содержание щелочей варьирует от 4,2 до 8,3 мас. % (табл. 1), что соответствует составам базальтов субщелочного ряда. Все базиты обогащены редкими литофильными, в том числе редкоземельными элементами по сравнению с толеитовыми базальтами срединно-океанических хребтов (MORB) и близки по составу к внутриплитовым субщелочным базальтам типа OIB (рис. 3). В то же время, по сравнению с OIB, они обеднены высокозарядными некогерентными элементами Nb, Ta, Zr, Hf, Ti и обогащены Ba, Sr и тяжёлыми редкими землями. Эти особенности их состава отражены в появлении на спайдер-диаграмме соответствующих минимумов и максимумов и характерны для источников расплавов, обогащённых водным флюидом и формирующих островодужные вулканические серии в субдукционных условиях [7]. Необходимо отметить, что содержания некогерентных литофильных

элементов находятся в прямой зависимости от кремнекислотности базитов, что свидетельствует о дифференциации исходных расплавов в магматическом очаге. Наиболее заметно увеличение Nb и Ta в высококремнистых базитах Новоселовского поднятия (пробы НВС 1/4 и НВС 1/5).

Дополнительную характеристику изменчивости состава источников расплавов в пределах изучаемых поднятий дают изотопные данные (табл. 2). Точки составов базитов, представленные на графике  $\varepsilon\text{Sr}(T) - \varepsilon\text{Nd}(T)$  (рис. 4) группируются в линейно вытянутое поле, которое отклоняется от тренда мантийной корреляции. При относительно стабильных значениях  $\varepsilon\text{Nd}$  это поле составов вытягивается параллельно к оси  $\varepsilon\text{Sr}(T)$  от области мантийных источников с параметрами PREMA в сторону составов, обогащённых радиогенным стронцием. Максимальное отклонение зафиксировано в базальте Новоселовского поднятия. Подобная закономерность предполагает плавление мантийного субстрата типа PREMA и дополнительного компонента с высоким содержанием Sr, повышенной величиной  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  и низкими содержаниями РЗЭ. Таким параметрам удовлетворяет карбонатный материал ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в морских карбонатах для возраста 400 млн л составляет около 0,708 по [10]), который, возможно, вовлекался в область плавления надсубдукционной мантии и менял состав первичных магм. Установленные особенности изотопных составов магматических источников корр-

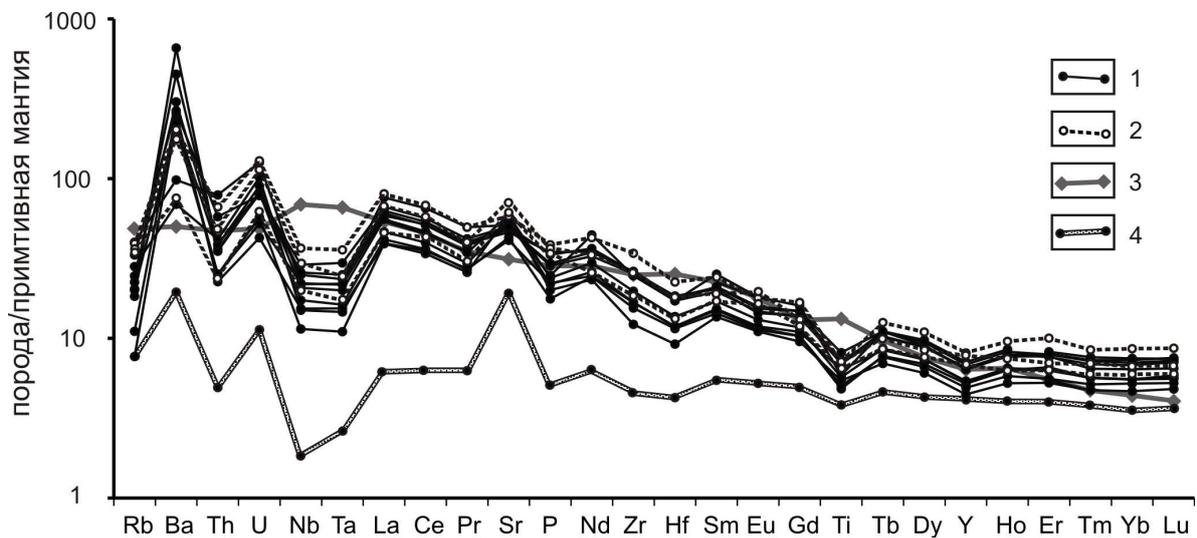


Рис. 3. График распределения редких и редкоземельных элементов в базитах. Спектры составов: 1) Копьевское и 2) Новоселовское поднятия (нормировано по [8]), 3) OIB по [8], 4) IAB по [9]

Таблица 2. Изотопный состав стронция и неодима в базитах Копьевского и Новоселовского поднятий

Проба	КОП 1/1	КОП 1/4	КОП 1/5	КОП 1/6	КОП 1/8	КОП 1/9	КОП 1/10	КОП 1/11	КОП 1/12	НВС 1/5
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}) \pm 2\sigma$	0,704969±24	0,705080±26	0,704509±9	0,704619±30	0,704942±11	0,704742±10	0,704708±15	0,704659±20	0,705062±15	0,705255±11
$\varepsilon\text{Sr}(T)$	4,6	6,1	-2,0	-0,4	4,2	1,4	0,9	0,2	5,9	8,6
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}) \pm 2\sigma$	0,512672±11	0,512739±7	0,512651±10	0,512712±7	0,512672±4	0,512646±7	0,512623±7	0,512670±18	0,51264±7	0,512634±9
$\varepsilon\text{Nd}(T)$	4,9	5,9	4,1	5,3	4,8	4,2	4,0	4,7	4,4	4,2

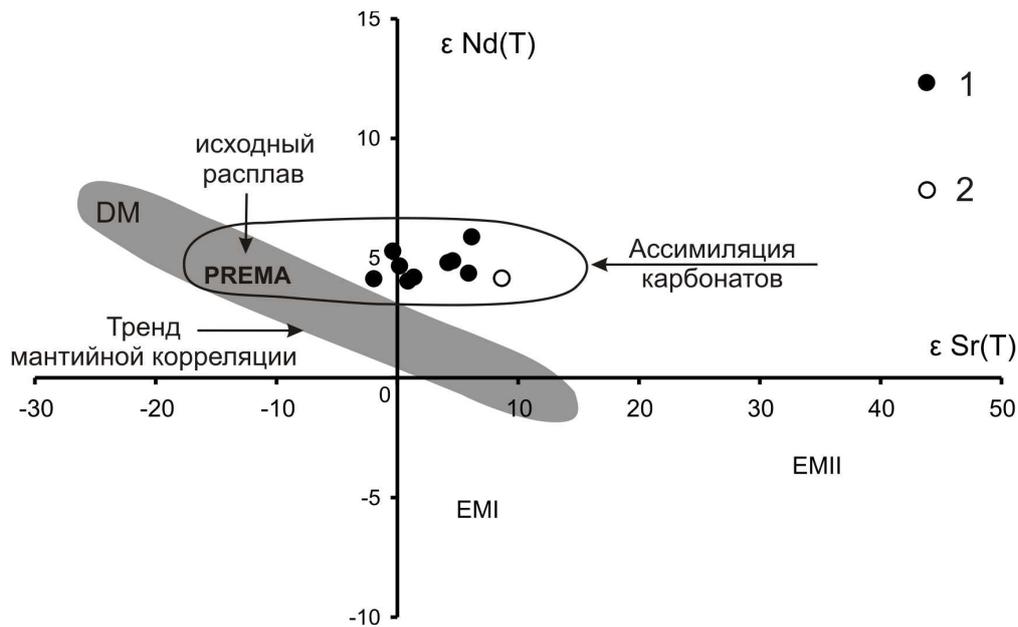


Рис. 4. Изотопный состав базитов Копьевского и Новоселовского поднятий на диаграмме  $\epsilon Sr(T) - \epsilon Nd(T)$ , где  $T=390$  млн л. Базиты, развитые в пределах поднятий: 1) Копьевского, 2) Новоселовского

лируют с геохимическими характеристиками базитов, в которых, как уже отмечалось, наряду с типичными внутриплитовыми метками прослеживаются субдукционные.

**Выводы**

Геологическое изучение ядерных частей антиклинальных поднятий, располагающихся в центральной части Чебаково-Балахтинской впадины Минусинского прогиба, позволило уточнить гетерогенное его строение. Наряду с преобладающими покровами субщелочных базальтов установлены покровы трахиандезитов с прослоями туфов, долеритовые силлы, а также трахит-трахидацитовые экструзивные тела и дайки.

Представленные геохимические и Sr-Nd изотопные характеристики базитов позволяют распознать в их образовании два источника расплавов. Один из них, близкий по параметрам к мантии типа PREMA, преобладает в составе базитов с геохимическими характеристиками обогащенных мантийных источников типа OIB и его, по-видимому, следует рассматривать как плюмовый источник. Другой источник можно сопоставить с мантией, метасоматизированной в надсубдукционных условиях. Его участие в магмообразовании привело к появлению геохимических признаков IAB и подтверждается заражением пород радиогенным стронцием.

Исследования поддержаны грантами РФФИ 10-05-0055 и 10-05-00730.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Воронцов А.А., Ярмолюк В.В., Сандимиров И.В., Никифоров А.В., Дриль С.И. Изотопный состав и источники магматизма девонской Алтае-Саянской внутриплитной области // Изотопные системы и время геологических процессов: Матер. IV Росс. конф. по изотопной геохронологии. – г. Санкт-Петербург, 2–4 июня 2009. – СПб.: Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, 2009. – Т. I. – С. 113–115.
2. Левченко С.В. Доплатформенная металлогения Кузнецко-Минусинского рудного района. – М.: Наука, 1975. – 192 с.
3. Лучицкий И.В. Вулканизм и тектоника девонских впадин Минусинского межгорного прогиба. – М.: АН СССР, 1960. – 276 с.
4. Ярмолюк В.В., Коваленко В.И. Рифтогенный магматизм активных континентальных окраин и его рудоносность. – М.: Наука, 1991. – 263 с.
5. Косоруков А.П., Парначев В.П. Геологическое строение и стратиграфия вулканогенно-осадочной серии западной части Копьевского купола Чебаково-Балахтинской впадины (Минусинская котловина) // Вопросы геологии Сибири. – 1994. – № 3. – С. 27–36.
6. Охалкин Н.А. Девонские травертины района Копьево (Минусинский межгорный прогиб) // Геология и геофизика. – 1961. – № 5. – С. 80–82.
7. Ryerson F.J., Watson E.B. Rutile saturation in magmas: Implications for Ti-Nb-Ta depletion in island-arc basalts // Earth Planet. Sci. Lett. – 1987. – V. 86. – P. 225–239.
8. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of ocean basalts: implications for mantle composition and processes // Magmatism in the ocean basins. Geol. Soc. Spec. Publ. – 1989. – № 42. – P. 313–345.
9. Гриб Е.Н., Леонов В.Л., Перепелов А.Б. Геохимия вулканических пород Карымского вулканического центра // Вулканология и сейсмология. – 2009. – № 6. – С. 3–25.
10. Burke W.H., Denison R.T., Hetherington E.A., Koenig R.B., Nelson N.F., Otto J.B. Variation of seawater  $^{87}Sr/^{86}Sr$  throughout Phanerozoic time // Geology. – 1982. – V. 10. – P. 516–519.

Поступила 04.05.2010 г.