

УДК 552.11:552.3:550.4 (571.151)

РОЛЬ ЗЕМНОЙ МАНТИИ В РАЗВИТИИ ВУЛКАНИЗМА ОКЕАНСКИХ ОСТРОВОВ В РАННЕМ ПАЛЕОЗОЕ

(по данным геохимии ОИВ юго-востока Горного Алтая)

В.В. Врублевский, В.И. Крупчатников, И.Ф. Гертнер

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

В юго-восточной части Горного Алтая (р. Ирбисту) среди раннепалеозойских метафлишиоидов горноалтайской серии проявлены высокотитанистые К-субщелочные (TiO_2 3–4; $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 3,4–7,7 мас. %; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ до 1,8–2,2) базальты. По уровню обогащения большинством LILE и HFSE (Rb 30–40, Ba 240–377, Zr 350–485, Nb 55–100, REE 190–300 г/т) и фракционирования лантаноидов ($\text{La}/\text{Yb} \approx 12\text{--}14$), величине индикаторных отношений (Nb/U 45–56; Th/La 0,11–0,13; Th/Nb 0,07–0,08; Rb/Nb 0,31–0,54; Ba/Nb 3–4,7; La/Nb 0,57–0,64) вулканиты сопоставимы с производными ОИВ-магматизма, имеющего внутриплитную плюмовую природу. Широкие вариации изотопного состава Nd и Sr (ϵ_{NdT} 1,7–5,0; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_\text{T}$ 0,7026–0,7039, ϵ_{SrT} от –18 до +0,1) позволяют предположить гетерогенность источников мантийного базальтового расплава и исключить его взаимодействие с супракrustальным материалом. Об этом же свидетельствуют первичные отношения изотопов свинца $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 17,75–17,85, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 15,48–15,49, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 37,35–37,62. Рассматривается вероятность магмогенерации в условиях смешения вещества умеренно деплетированной (PREMA) и обогащенной (ЕМ 1) мантии, но без участия HIMU-домена, нередко инициирующего ОИВ-вулканизм. Установленное в породах распределение LREE и HREE могло быть вызвано 7–8%-ным равновесным плавлением модельного гранатового лерцолита мантии, которое приводило к возникновению родоначальной магмы наподобие среднего ОИВ. Допускаются присутствие в источнике незначительного количества шпинели или смешение расплавов перидотита разного состава.

Ключевые слова: вулканизм океанских островов, геохимия рассеянных элементов и изотопов Nd–Sr–Pb, мантия, генерация базальтовых магм, Горный Алтай.

Введение

Базальтовый магматизм океанических островов (ОИВ = Ocean Island Basalts) обычно связывают с деятельностью мантийных плюмов, проплавливающих океанскую литосферу на разных стадиях ее развития [Condie, 2001; Hofmann, 2003; Stracke et al., 2005]. Предполагается, что наблюдаемое разнообразие ОИВ обусловлено гетерогенностью глубинных источников вещества, а благодаря изолированной позиции проявлений ОИВ в морских бассейнах их коровая контаминация существенно ограничена. Участие подобных образований в строении древних складчатых областей свидетельствует об океанической эпохе зарождения протоорогенных структур, происходивших процессах внутриплитной геодинамической активности и эволюции земной мантии.

В этом отношении показательным примером является Центрально-Азиатский подвижный пояс (ЦАПП), который обрамляет с юга докембрийский Сибирский кратон и обычно рассматривается как супертеррейн, сформированный примерно 500 млн лет назад в период закрытия Палеоазиатского океана. В связи с происходившими процессами аккреции океанической литосферы в составе пояса фиксируются фрагменты спрединговых хребтов, островных дуг, подводных плато и вулканических островов. В его северо-западной части среди каледонид Кузнецко-Алтайского тектонического блока нередко отмечаются останцы палеосимаунтов, содержащие метабазальты наподобие ОИВ [Добрецов и

др., 2004; Волкова и др., 2005; Сафонова и др., 2008; 2011; Safonova et al., 2011; Врублевский и др. 2016]. Совместно с офиолитами рифея–кембрия они рассматриваются как реликты океанической литосферы на активной окраине Сибирского палеоконтинента.

На юго-востоке Горного (Русского) Алтая в бассейне р. Ирбисту (район Чуйской впадины) нами изучен еще один небольшой по размерам (~ 500 × 700 м) тектонизированный фрагмент покрова базальтов, геохимически сходных с ОИВ [Крупчатников и др., 2011]. Приуроченность вулканитов к метафлишиоидным отложениям горноалтайской серии позволяет условно считать их кембрийскими образованиями. Породы обладают преимущественно массивным плагиопорфировым обликом с элементами миндалекаменного и брекчиевидного строения. Установленные особенности редкоэлементного и изотопного состава Nd, Sr, Pb базальтов позволяют предполагать гетерогенный источник родоначальной магмы ОИВ со смешением вещества умеренно деплетированной и обогащенной мантии, а также частичное плавление ее модельного протолита, сопоставимого с гранатовым лерцолитом.

Аналитические методы

Содержания петрогенных и редких рассеянных элементов в базальтах измерены методами рентгенофлуоресцентного анализа (РФА), энергодисперсионный спектрометр Oxford ED2000, спектрометр ARL-9900 XL) и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной

плазмой (ICP–MS, масс-спектрометр высокого разрешения Agilent 7500cx) в Аналитических центрах ТГУ (г. Томск), ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург), ИГМ СО РАН (г. Новосибирск).

Изотопный состав Sm–Nd и Rb–Sr изучен на масс-спектрометрах Finnigan MAT–262 и МИ 1201–Т в Геологическом институте КНЦ РАН (г. Апатиты) по стандартной методике. Величина эpsilon и первичные изотопные отношения неодима и стронция рассчитаны на возраст 500 млн лет (современный CHUR $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,512638$; $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0,1967$), UR ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,7045$; $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} = 0,0827$). Концен-

трации Rb и Sr определены изотопным разбавлением с точностью 1%. Среднее по стандарту La Jolla $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,511828$ (N=9). $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ нормализовано к значению 0,710235 по NBS SRM–987.

Изотопный Pb–Pb анализ проводился на приборных MC–ICP–MS-комплексах Nu Instruments Plasma (Nu 021) в Тихоокеанском центре изотопных и геохимических исследований Университета Британской Колумбии, Канада и Neptune в ИГЕМ РАН (г. Москва). Измерения эталонированы по NBS SRM 981 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 36,7202 \pm 58$; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15,4999 \pm 20$; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 16,9431 \pm 21$ (N = 19).

Таблица 1

Химический состав базальтов в бассейне р. Ирбисту

Table 1

Chemical composition of basalts, Irbistu River basin

Компонент	8034	8049	30106	ИРБ-3
SiO ₂	46,90	45,98	48,20	48,49
TiO ₂	3,93	3,81	3,24	3,69
Al ₂ O ₃	18,51	17,82	17,70	18,83
Fe ₂ O ₃	12,95	14,16	14,10	13,97
MnO	0,06	0,06	0,09	0,04
MgO	5,87	6,08	3,20	5,64
CaO	1,77	2,91	2,21	0,92
Na ₂ O	1,49	1,04	5,38	1,25
K ₂ O	2,22	2,31	2,28	2,31
P ₂ O ₅	0,62	0,54	1,19	0,56
П.п.п.	5,24	4,89	2,46	4,68
Сумма	99,55	99,60	100,10	100,38
Sc	22	21	15	16
V	189	216	128	181
Cr	5	5	17	11
Ni	16	9	5	20
Co	29	32	27	21
Cs	1,5	0,94	1,1	0,5
Rb	43	38	31	27
Ba	372	377	302	241
Sr	87	74	122	78
Nb	79	81	101	54
Ta	4,5	5	5,2	3,9
Zr	424	431	485	352
Hf	9,9	11	10	7,4
Y	41	39	45	18
Th	5,3	6	6,6*	4,3
U	1,7	1,8	1,8*	1,7
Pb	2	1,4	2,4*	0,97
La	47	52	58	33
Ce	103	108	121	83
Pr	13	14	14	8,3
Nd	50	60	57	38
Sm	10	13	11	7,7
Eu	3,1	4,1	3,6	2,1
Gd	9,8	10	12	5,9
Tb	1,4	1,5	1,8	0,82
Dy	7,7	7,9	9	4,2
Ho	1,4	1,4	1,7	0,75
Er	3,3	3,7	4,1	2
Tm	0,44	0,48	0,55	0,28
Yb	2,4	2,8	3,4	1,7
Lu	0,32	0,37	0,51	0,25
ΣREE	253	279	298	188

Примечание. Оксиды – в мас. %, элементы – в г/т. Концентрации определены методом изотопного разбавления в ЦИИ Университета Британской Колумбии, г. Ванкувер, Канада.

Геохимические особенности базальтов

Петрогенные и редкие рассеянные элементы. Базальты, изученные в бассейне р. Ирбисту, по соотношению SiO_2 (~46–48,5 мас. %), $\Sigma\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ (~3,4–7,7 мас. %) и $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (до 1,8–2,2) соответствуют производным субщелочной калиевой серии (см. табл. 1, рис. 1).

Для пород характерны относительно небольшие концентрации MgO 3,2–6,1 мас. % (Mg\# 31–47), CaO (0,9–2,9 мас. %), Cr (5–17 г/т), Ni (5–20 г/т) и Sc (15–22 г/т), что при повышенных содержаниях Al_2O_3 (17,7–18,8 мас. %) может свидетельствовать о раннем фракционировании оливина, клинопироксена, хромита. Уровень титанистости (3,2–3,9 мас. %),

особенности накопления LILE и HFSE идентичны параметрам распределения химических элементов в среднем ОИБ (рис. 2, 3).

Вместе с тем при сходной степени фракционирования редких земель ($\Sigma\text{REE} \sim 190\text{--}300$ г/т; La_N/Yb_N 12–14) базальты отличаются дефицитом Sr (74–122 г/т) и более высокими U/Pb (до 0,85–1,8) и Ce/Pb (до 52–86), чем в ОИБ (~0,32 и ~25). Похожая отрицательная аномалия Sr наблюдается в раннепалеозойских глаукофановых сланцах Уймонской зоны Горного Алтая и расположенной южнее (на границе с Таримским кратоном) Западной Джунгарии, для которых в качестве протолита предполагаются геохимически сходные щелочные базальты ОИБ-типа [Волкова и др., 2005; Vo et al., 2016].

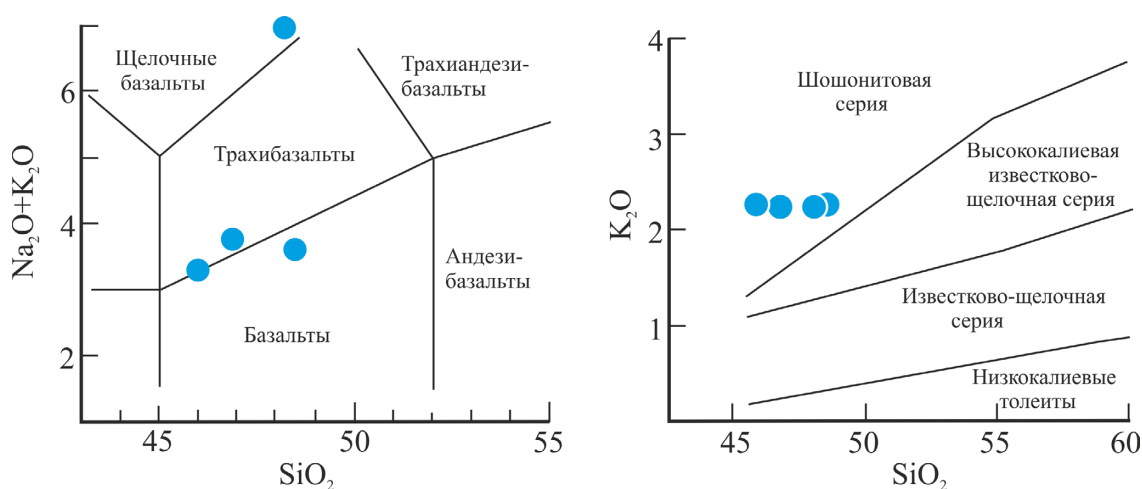


Рис. 1. Петрохимическая типизация базальтов бассейна р. Ирбисту, мас. %

Диаграммы TAS и $\text{SiO}_2\text{--K}_2\text{O}$ приведены по Le Maître et al., 1989; Peccerillo, Taylor, 1976 [Врублевский и др., 2012]

Fig. 1. Petrochemistry of the Irbitu River basalts, wt %

TAS and $\text{SiO}_2\text{--K}_2\text{O}$ diagrams are given according to Le Maître et al.; 1989, Peccerillo, Taylor, 1976 [Vrublevskii et al., 2012]

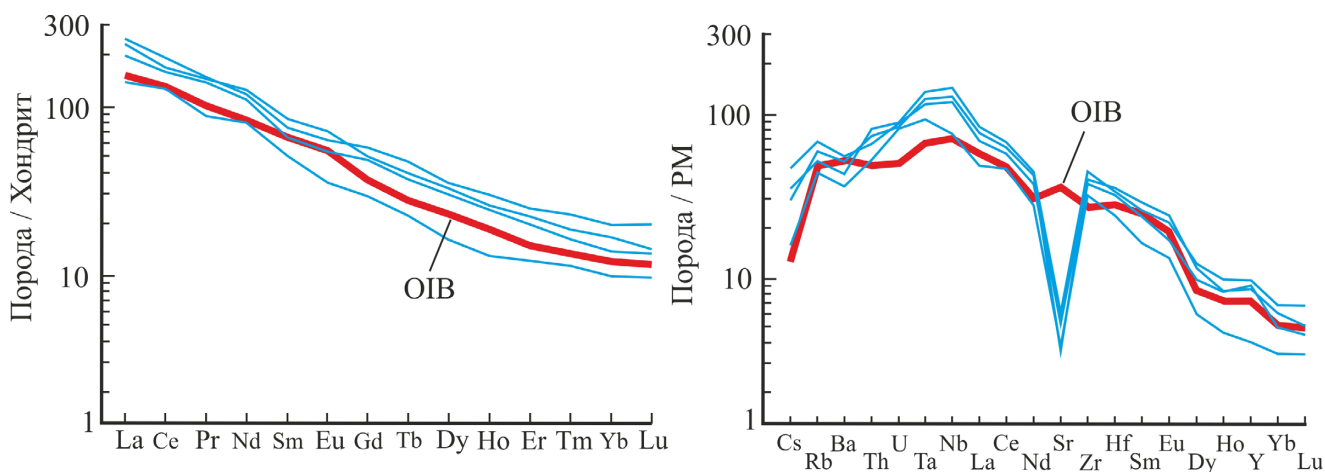


Рис. 2. Распределение редких и рассеянных элементов в базальтах бассейна р. Ирбисту

Состав хондрита, примитивной мантии (PM) и среднего ОИБ по [Sun, McDonough, 1989]

Fig. 2. Chondrite- and primitive mantle normalized trace element diagrams of the Irbitu River basalts

Chondrite, primitive mantle (PM) and average OIB compositions are given according to [Sun, McDonough, 1989]

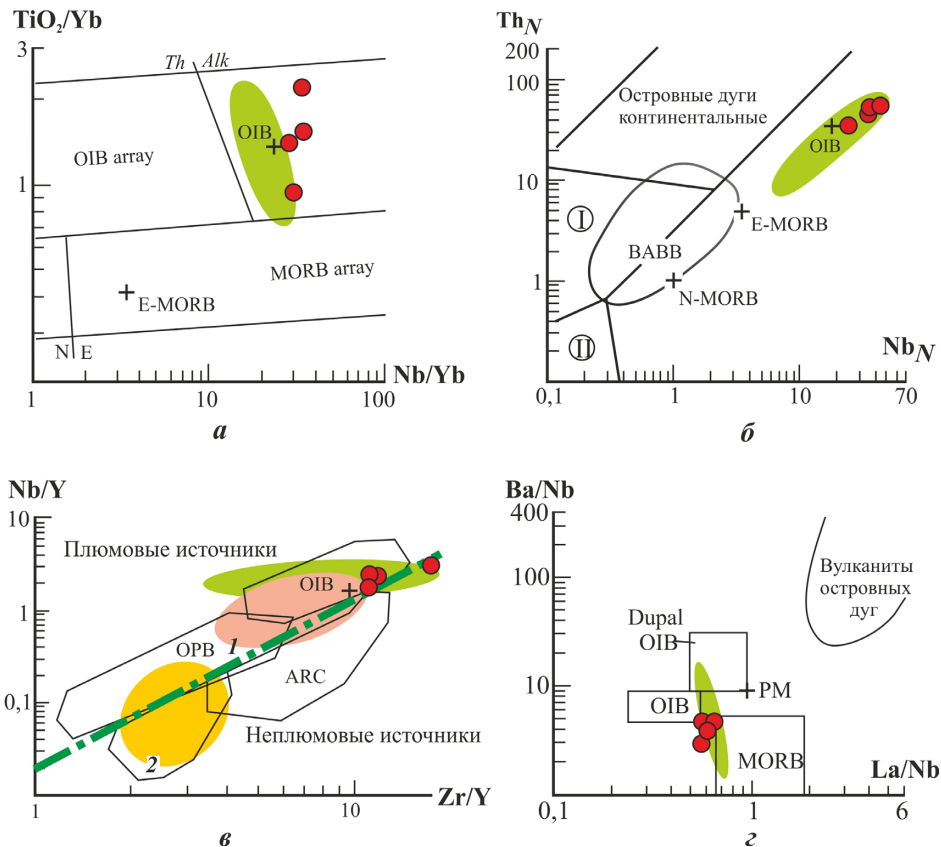


Рис. 3. Геохимические особенности базальтов различных геодинамических обстановок

Красные кружки – составы базальтов бассейна р. Ирбисту; область зеленого цвета – позднедокембрийские базальты ОИВ-типа Кузнецкого Алатау [Врублевский и др., 2016]. *a* – TiO_2/Yb – Nb/Yb [Pearce, 2008]: выделены толеитовые (*Th*) и щелочные (*Alk*) разновидности ОИВ, нормальные (N-MORB) и обогащенные (E-MORB) базальты срединно-океанических хребтов (крестами отмечены средние значения). *b* – Th_N – Nb_N [Saccani, 2015]: I–II – внутриокеанические зрелые (I) и юные (II) островные дуги; BABB (Back-Arc Basin Basalts) – базальты задуговых бассейнов; нормализация по N-MORB [Sun, McDonough, 1989]. *c* – Nb/Y – Zr/Y [Condie, 2005]: базальты океанических плато (OPB) и островных дуг (ARC); демаркация плюмовых и неплюмовых источников. Области 1–2: преобладающие составы обогащенных (1 – засурийская, шельдянская, манжерокская свиты) и обедненных (2 – засурийская свита, вулканы Курайской зоны) базальтов аккреционных комплексов Горного Алтая [Сафонова и др., 2008; 2011; Safonova et al., 2011; Гусев, 2014]. *d* – Ba/Nb – La/Nb [Bi et al., 2015]: состав примитивной мантии (PM) по [Weaver, 1991]

Fig. 3. Geochemical characteristics of the basalts from different geodynamic settings

Red points – compositions of the Irbitu River basalts; green field – late Precambrian OIB-type basalts of Kuznetsk Alatau [Vrublevskii et al., 2016]. *a* – TiO_2/Yb – Nb/Yb [Pearce, 2008]: tholeiitic (*Th*) and alkaline (*Alk*) kinds of OIB, normal (N-MORB) and enriched (E-MORB) basalts of mid-ocean ridges (crosses mark average values) are distinguished. *b* – Th_N – Nb_N [Saccani, 2015]: I–II – intraoceanic mature (I) and young (II) island arcs; BABB – Back-Arc Basin Basalts; normalized by N-MORB [Sun, McDonough, 1989]. *c* – Nb/Y – Zr/Y [Condie, 2005]: oceanic plateau basalts (OPB) and island arc ones (ARC); demarcation of plume and non-plume sources. Fields 1–2: prevailing compositions of enriched (1 – Zasuryin, Sheldyan, Mangerok suites) and depleted (2 – Zasuryin suite, Kuray zone volcanites) basalts of accretionary complexes of Altai Mountains [Safonova et al., 2008; 2011; Safonova et al., 2011; Gusev, 2014]. *d* – Ba/Nb – La/Nb [Bi et al., 2015]: primitive mantle (PM) composition according to [Weaver, 1991]

Изотопный состав. По сравнению с небольшими, допустимыми для ОИВ вариациями содержания редких и рассеянных элементов в породах первичные отношения изотопов Nd и Sr заметно меняются даже при малых размерах вулканического поля ($^{143}Nd/^{144}Nd_T$ 0,512082–0,512250; $\epsilon_{Nd}T \sim 1,7$ – $5,0$; $^{87}Sr/^{86}Sr_T$ 0,7026–0,7039; $\epsilon_{Sr}T \sim -18$ до $+0,1$; табл. 2). Отличие базальтов по степени их деплетированности позволяет предположить участие в магмогенезисе разнородного мантийного

вещества и исключить влияние верхнекоревой контаминации.

Два измеренных образца базальтов обладают практически одинаковым изотопным составом свинца ($^{206}Pb/^{204}Pb_{in}$ 17,75–17,85; $^{207}Pb/^{204}Pb_{in}$ 15,48–15,49; $^{208}Pb/^{204}Pb_{in}$ 37,35–37,62). Он сопоставим с метеоритной геохроной и линией эволюции на уровне ~ 500 – 600 млн лет (табл. 3, рис. 4, *a*, *c*), что может свидетельствовать о формировании из одного родоначального расплава.

Таблица 2

Изотопный состав Nd и Sr в базальтах бассейна р. Ирбисту

Table 2

Nd–Sr isotopic composition for the Irbistu River basalts

Образец	Sm	Nd	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}, \pm 2\sigma$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_T$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(T)$	Rb	Sr	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}, \pm 2\sigma$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_T$	$\varepsilon_{\text{Sr}}(T)$
	г/г	г/г					г/г	г/г				
8049	12,2	55	0,1342	$0,512619 \pm 5$	0,512179	3,61	43,7	80,7	1,40395	$0,71264 \pm 10$	0,70263	–18,2
30106	12,7	62,7	0,122067	$0,512482 \pm 4$	0,512082	1,72	32,2	125	0,724273	$0,70906 \pm 19$	0,70390	0,1
ИРБ-3	9,7	49,4	0,118255	$0,512637 \pm 9$	0,512250	5,00	37,7	98,2	1,082877	$0,71146 \pm 17$	0,70374	–2,1

Таблица 3

Изотопный состав свинца в базальтах, щелочных породах и карбонатитах Горного Алтая и Кузнецкого Алатау

Table 3

Pb isotopic composition for the basalts, alkaline rocks and carbonatites of the Gorny Altai and Kuznetsk Alatau

Местонахождение, массив	Образец, порода, минерал	U	Th	Pb	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_m$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_m$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_m$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{in}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{in}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{in}$
		г/г								
Горный Алтай										
Бассейн р. Ирбисту	30105, Б	1,69	5,44	1,87	22,946	15,784	42,703	17,754	15,487	37,349
	30106, Б	1,82	6,57	2,37	22,219	15,744	42,680	17,846	15,494	37,623
	В-17, ЩП	2,83	4,44	3,53	24,215	15,896	40,312	19,672	15,637	38,021
	В-10, К, Pyr	0,078	0,007	1664	18,048	15,540	37,682	18,047	15,540	37,682
Кузнецкий Алатау										
Петропавлов- ский	ПТ-14, ПИ	2,01	2,76	6,10	19,637	15,629	38,249	17,924	15,531	37,494
Горячегогорский*	Г-11/7, ПИ	1,84	2,33	3,96	20,561	15,640	38,259	19,293	15,575	37,735
	Кия- Г	0,61	0,71	2,61	18,993	15,581	38,005	18,048	15,529	37,650
Шалтырский**	И	1,72	1,80	3,41	20,654	15,690	38,481	18,358	15,564	37,722
	У	0,97	1,00	1,25	21,671	15,754	38,930	18,339	15,572	37,829
	НС, KFsp	0,49	0,68	7,4	18,516	15,568	37,717	18,215	15,552	37,598
	Pyr	0,011	0,016	2,2	18,210	15,550	37,599	18,187	15,549	37,590
	Pyr	0,016	0,026	2,8	18,217	15,550	37,597	18,191	15,548	37,585

Примечание. Б – базальт, ЩП – щелочной клинопироксенит, Г – габбро, И – ийолит, У – уртит, ПИ – полевошпатовый ийолит, НС – нефелиновый сиенит, К – карбонатит, KFsp – калиевый полевой шпат, Pyr – пирит, Pyrr – пирротин. Изотопные отношения: *m* – измеренное, *in* – первичное (рассчитано на возраст 500 млн лет; * – 265 млн лет; ** – 400 млн лет).

На Pb/Pb-диаграммах породы наряду с некоторыми другими производными кембрийского магматизма Горного Алтая и сопредельного Кузнецкого Алатау локализованы в области MORB и вблизи среднего состава умеренно деплетированной мантии PREMA. Считается, что в качестве одного из компонентов аналогичное вещество ($\varepsilon_{\text{Nd}} \sim 4$; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \sim 0,7038$; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \sim 18,3$; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \sim 15,5$; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \sim 37,7$) могло непосредственно участвовать в инициации внутриплитного базитового вулканизма провинции Бассейнов и Хребтов в Северной Америке [Рассказов и др., 2005].

Обсуждение результатов

Гетерогенность источника вещества OIB. По существующим представлениям геохимические отличия базальтов океанских островов обусловлены участием в их петрогенезисе разнородного вещества мантии DMM, HIMU, EM I, EM II, FOZO, а также субдуцированной океанической коры и континентальных осадков (например: [Weaver, 1991;

Hofmann, 2003; Stracke et al., 2003; 2005; Jackson et al., 2007]). Как важный регулирующий фактор рассматривается процесс рециклинга древней метасоматизированной литосферы под воздействием плюмов [Dickin, 2005; Pilet et al., 2005; Niu et al., 2012].

Внутриплитная природа изученных базальтов отчетливо проявлена в виде их обогащенности большинством несовместимых элементов подобно OIB (см. рис. 2, 3). Исключение представляет Sr-минимум, который может отражать свойство магматического источника. На его мантийное происхождение и отсутствие признаков взаимодействия расплава с материалом континентальной коры указывают высокое Nb/U (до 45–56) и одновременно пониженные значения $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (см. рис. 4, б).

По величине соотношений Th/La ($\sim 0,11$ – $0,13$), Th/Nb ($\sim 0,07$ – $0,08$), Rb/Nb ($\sim 0,31$ – $0,54$), Ba/Nb (~ 3 – $4,7$), La/Nb ($0,57$ – $0,64$) и изотопов свинца породы обладают уровнем накопления химических элементов, сходным с MORB [Weaver, 1991] (также см. рис. 3, 4, в–г).

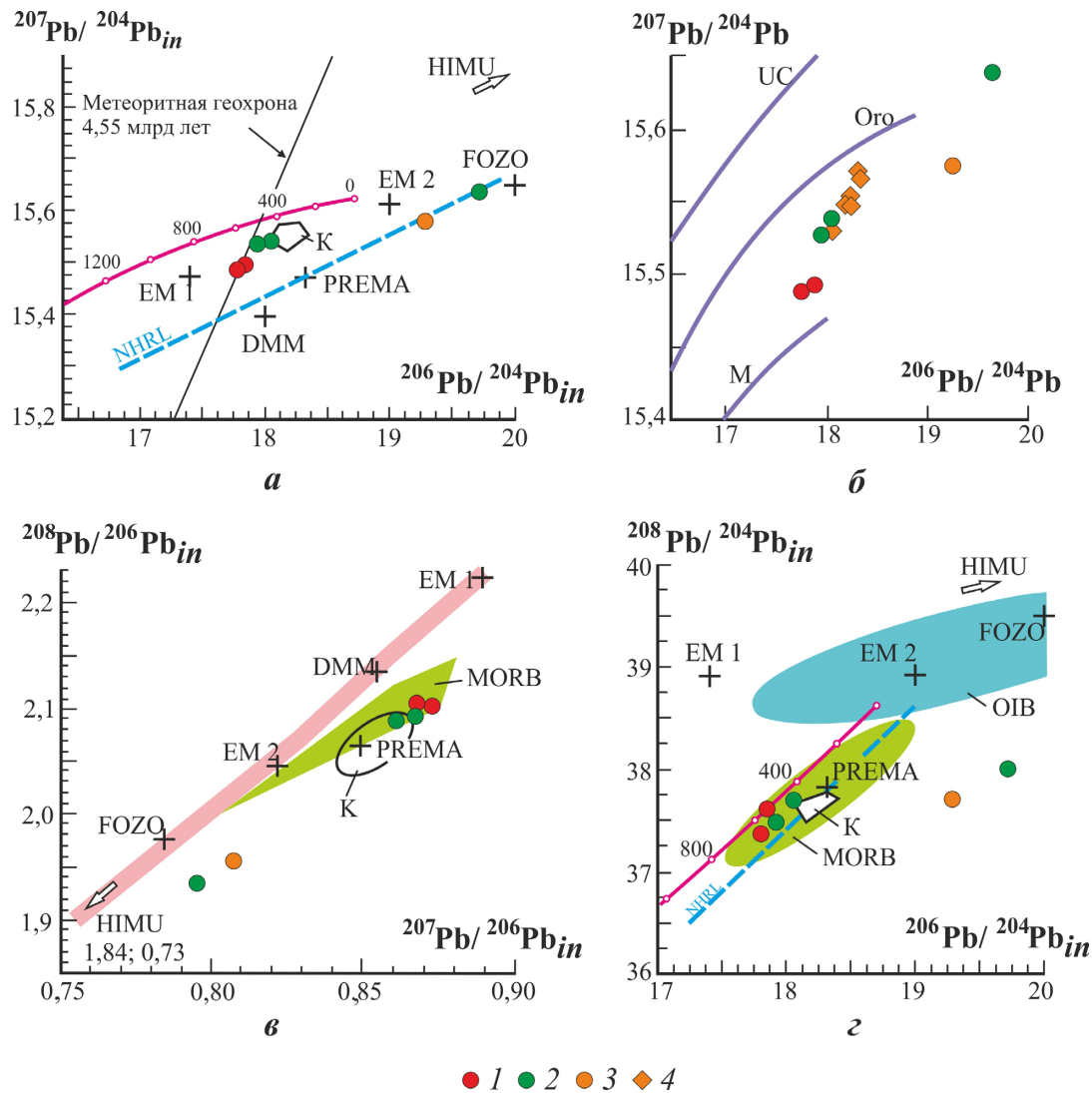


Рис. 4. Изотопный Pb–Pb состав базальтов, щелочных интрузий, карбонатитов Горного Алтая и Кузнецкого Алатау

1 – базальты бассейна р. Ирбисту; 2 – щелочные породы и пирит из карбонатитов ($T \sim 500\text{--}510$ млн лет) Горного Алтая и Кузнецкого Алатау; 3–4 – щелочные породы и минералы (пирротин, К – полево шпат) Горячегогорского (3, $T \sim 265$ млн лет) и Кия-Шалтырского (4, контур «К», $T \sim 400$ млн лет) массивов Кузнецкого Алатау. Составы современных мантийных доменов PREMA, HIMU, FOZO, MORB/DMM, EM I, EM II, OIB, элементы плюмботектоники и изотопной эволюции свинца по [Armienti, Gasperini, 2007; Hart et al., 1992; Stacey, Kramers, 1975; Stracke et al., 2003; 2005; Zartman, Doe, 1981; Zartman, Haines, 1988; Zindler, Hart, 1986]. Сравнение проводилось с учетом возможной магмогенерации из аналогичных мантийных субстратов в разные геологические эпохи. NHRL – Northern Hemisphere Reference Line [Hart, 1984]. На диаграмме $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (б) показаны кривые роста изотопных отношений в мантии и земной коре: UC = upper crust, Oro = Orogenic, M = Mantle [Zartman, Doe, 1981]

Fig. 4. Pb–Pb isotopic composition for the basalts, alkaline intrusions, carbonatites of the Gornyy Altai and Kuznetsk Alatau

1 – Irbitsu River basin basalts; 2 – alkaline rocks and pyrite from carbonatites ($T \sim 500\text{--}510$ Ma) of Altai Mountains and Kuznetsk Alatau; 3–4 – alkaline rocks and minerals (pyrrhotine, K – feldspar) of Goryachegorsk (3, $T \sim 265$ Ma) and Kiya-Shaltyr (4, «K» contour, $T \sim 400$ Ma) massifs of Kuznetsk Alatau. Compositions of such modern mantle domains as PREMA, HIMU, FOZO, MORB/DMM, EM I, EM II, OIB, plumbotectonics elements and lead isotopic evolution are given according to [Armienti, Gasperini, 2007; Hart et al., 1992; Stacey, Kramers, 1975; Stracke et al., 2003; 2005; Zartman, Doe, 1981; Zartman, Haines, 1988; Zindler, Hart, 1986]. The comparison was carried out with taking into consideration of possible magma generation from similar mantle substrata at different epochs. NHRL – Northern Hemisphere Reference Line [Hart, 1984]. At the $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram (b) graphs of isotopic ratios increase in mantle and crust are shown: UC = upper crust, Oro = Orogenic, M = Mantle [Zartman, Doe, 1981]

По некоторым из этих параметров они сопоставимы с производными позднедокембрийского ОИВ-магматизма Кузнецкого Алатау [Врублевский и др.,

2016]. В близких по химизму вулканических ассоциациях Горного Алтая нередко наблюдаются вариации состава, также свидетельствующие о более раз-

нообразном магматическом протолите с заметным участием вещества MORB и OPB (см. рис. 3). Как правило, отмеченные особенности связывают с деятельностью мантийного плюма.

Несмотря на общность распределения редких и рассеянных элементов, базальты бассейна р. Ирбисту неоднородны по изотопному составу Nd и Sr даже по сравнению с полифазными щелочными интрузиями региона (рис. 5, а). Вместе с тем величины $\epsilon_{Nd}T$ и $\epsilon_{Sr}T$ варьируют в диапазоне мантийной последовательности, характерной для плюмовых образований, и сопоставимы, например, с интервалом для вулканитов Катунского аккреционного комплекса Горного Алтая. Наблюдаемый

разброс значений позволяет предположить гетерогенный источник базальтовой магмы, возникший при смешении вещества умеренно деплетированной (PREMA) и обогащенной (EM 1) мантии. Участие резервуара HIMU, нередко генерирующего ОИВ-магматизм, не подтверждается данными по изотопному составу свинца (см. рис. 4). В связи с вероятным существованием глубинного мультикомпонентного субстрата отметим, что для модельной верхней мантии SUMA (Statistical Upper Mantle Assemblage) допускается ее значительная неоднородность, которой может быть обусловлено все многообразие MORB и ОИВ [Meibom, Anderson, 2003].

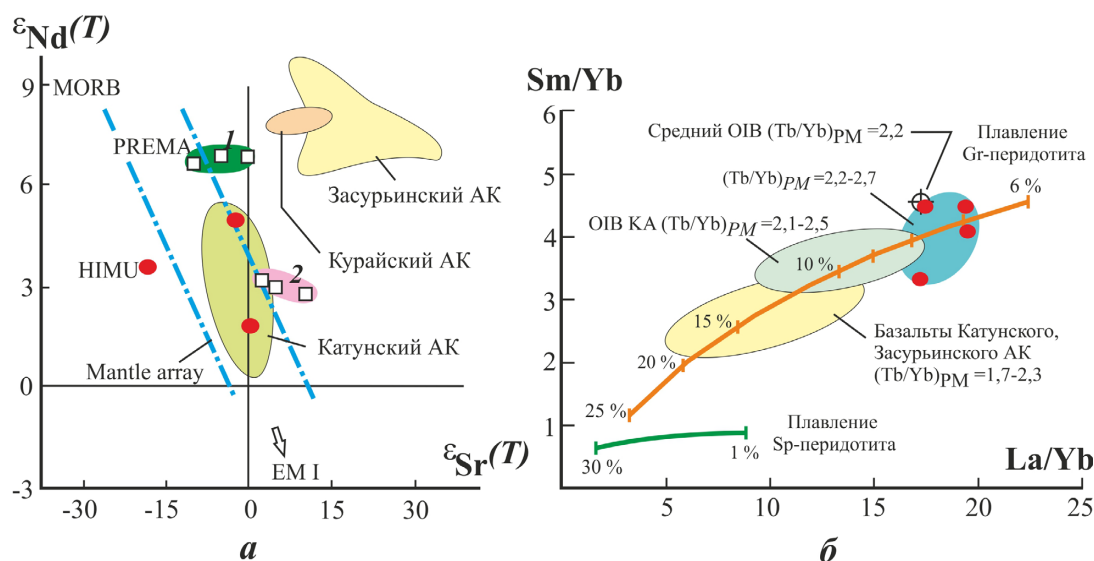


Рис. 5. Изотопная Nd–Sr систематика, состав и степень плавления магматического протолита базитовых пород

Красные эллипсы – базальты бассейна р. Ирбисту. а – диаграмма $\epsilon_{Nd}T - \epsilon_{Sr}T$. Контуры 1 и 2 – составы субщелочных-щелочных пород и карбонатитов комплекса эдельвейс (1, ~ 507 млн лет), Теранджикского плутона (2 ~ 247 млн лет) в Горном Алтае [Врублевский и др., 2012; Крупчатников и др., 2015]; показаны изотопные вариации в базальтах Курайского, Катунского, Засурийского региональных аккреционных комплексов (АК) позднего докембрия – раннего палеозоя [Сафонова, 2008; Сафонова и др., 2011; Safonova et al., 2011]. Область Mantle array и положение резервуаров MORB, PREMA, HIMU, EM I обозначены в соответствии с их современными изотопными параметрами [Zindler, Hart, 1986]. б – диаграмма Sm/Yb – La/Yb [Xu et al., 2005]: на кривых плавления гранатового (Gr) и шпинелевого (Sp) модельных перидотитов отмечена доля (%) расплава. Коэффициент $(Tb/Yb)_{PM}$ [Wang et al., 2002] нормализован по составу примитивной мантии [Sun, McDonough, 1989] (см. текст). Средний ОИВ по [Sun, McDonough, 1989]; ОИВ КА – состав базальтов океанских островов Кузнецкого Алатау [Врублевский, Котельников, Крупчатников, 2016]. Базальты Катунского, Засурийского АК (см. литературу к рис. 5)

Fig. 5. Nd–Sr isotope systematics (a), composition and melting degree of the magmatic protolith for the mafic rocks

Red ellipses = Irbistu River basalts. a – $\epsilon_{Nd}T - \epsilon_{Sr}T$ diagram. 1 and 2 sections – compositions of subalkaline-alkaline rocks and carbonatites of Edelweiss complex (1, ~ 507 Ma), Terangik pluton (2 ~ 247 Ma) at Gorny Altai [Vrublevskii et al., 2012; Krupchatnikov, Vrublevskii, Kruk, 2015]; isotopic variations in basalts of late Precambrian and early Paleozoic Kuray, Katun, Zasuryin accretionary complexes (AK) are shown [Safonova, 2008; Safonova et al., 2011]. Mantle array section and MORB, PREMA, HIMU, EM I locations are given in accordance with their modern isotopic parameters [Zindler, Hart, 1986]. b – Sm/Yb – La/Yb diagram [Xu et al., 2005]: melt portions (%) are noted at garnet (Gr) and spinel (Sp) model peridotites melting graphs. $(Tb/Yb)_{PM}$ ratio [Wang et al., 2002] is normalized to primitive mantle composition [Sun, McDonough, 1989] (see in the text). Average OIB composition is given according to [Sun, McDonough, 1989]; OIB KA – composition of oceanic islands basalts of Kuznetsk Alatau [Vrublevskii, Kotelnikov, Krupchatnikov, 2016]. Katun, Zasuryin complexes basalts (see references for fig. 5)

Степень плавления и уровень глубинности мантийного магматического протолита. Согласно

представлениям [Hofmann, 2003], генерация родоначальной ОИВ-магмы происходит при низкой степени

плавления материала пиролитовой мантии. На присутствие граната в модельном перидотите источника изученных базальтов могут указывать повышенные концентрации в них HREE (~ 16–33 г/т) и Y (18–45 г/т). Характер соотношений легких и тяжелых лантаноидов в породах позволяет предполагать, что магмообразование наподобие среднего ОИВ происходило в условиях ~ 7–8% равновесного плавления модельного гранатового лерцолита мантии (рис. 5, б). Как было показано ранее [Крупчатников, 2011], поведение редких элементов могло быть вызвано смешением расплавов перидотита разного состава или наличием исходного гранат-шпинелевого парагенезиса.

По существующим оценкам уровень субсолидусного фазового перехода шпинель – гранат в мантийных перидотитах соответствует глубине ~ 100 км и давлению ~ 30 кбар [Klemme et al., 2000; Robinson, Wood, 1998]. Предположительно, при плавлении гранатовых перидотитов их базальтовые производные будут обладать более высокими значениями $(\text{Tb/Yb})_{PM} > 1,8$ в отличие от шпинелевых разновидностей [Wang et al., 2002]. В базальтах бассейна р. Ирбисту коэффициент $(\text{Tb/Yb})_{PM}$ изменяется в интервале ~ 2,2–2,7, что может свидетельствовать о несколько большей глубине протолита по сравнению с ОИВ Кузнецкого Алатау при сходной степени плавления (см. рис. 5, б). Как видно на примере обо-

гащенных вулканитов Катунского и Засурийского аккреционных комплексов северной части Горного Алтая, условия зарождения (глубинность, доля расплавов, масштабы смешения вещества) материнских магм заметно отличаются даже для сближенных во времени и пространстве разновидностей ОИВ.

Таким образом, изученные базальты можно рассматривать как производные внутримантийного ОИВ-вулканизма, развитие которого, как и в Кузнецком Алатау, происходило под влиянием горячей точки на литосферу закрывающегося Палеоазиатского океана. В качестве регуляторов магматической эволюции предполагается не только гетерогенность самого плюма, но также состав, глубина и степень плавления мантийных протолитов. При этом допускается смешение глубинного вещества по типу PREMA + EM 1, а также 7–8%-ное парциальное плавление модельного гранатового лерцолита мантии.

Авторы благодарны сотрудникам ГИН КНЦ РАН (г. Апатиты), аналитических центров ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург), ИГМ СО РАН (г. Новосибирск), ТГУ (г. Томск), ИГЕМ РАН (г. Москва) и Университета Британской Колумбии (г. Ванкувер, Канада) за участие в исследованиях. Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ и Томского государственного университета (проекты 1013, 8.1.14.2015).

ЛИТЕРАТУРА

- Волкова Н.И., Ступаков С.И., Третьяков Г.А. и др. Глаукофановые сланцы Уймонской зоны – свидетельство ордовикских аккреционно-коллизионных событий в Горном Алтае // Геология и геофизика. 2005. Т. 46 (4). С. 367–382.
- Врублевский В.В., Крупчатников В.И., Изох А.Э., Гертнер И.Ф. Щелочные породы и карбонатиты Горного Алтая (комплекс эдельвейс): индикатор раннепалеозойского плюмового магматизма в Центрально-Азиатском складчатом поясе // Геология и геофизика. 2012. Т. 53 (8). С. 945–963.
- Врублевский В.В., Котельников А.Д., Крупчатников В.И. Позднедокембрийский ОИВ-магматизм Кузнецкого Алатау, Сибирь: геохимические особенности вулканитов кульбюрстюгской свиты // Доклады Академии наук. 2016. Т. 469 (4). С. 457–460.
- Гусев А.И. Метабазиты Алтая, близкие к мантийным базальтоидам Dupal-аномалии // Природные ресурсы Горного Алтая. 2014. № 18 (1–2). С. 13–23.
- Добрецов Н.Л., Буслов М.М., Сафонова И.Ю., Кох Д.А. Фрагменты океанических островов в структуре Курайского и Катунского аккреционных клиньев Горного Алтая // Геология и геофизика. 2004. Т. 45 (12). С. 1381–1403.
- Крупчатников В.И., Врублевский В.В., Гертнер И.Ф., Кривчиков В.А. Базальты ОИВ-типа бассейна р. Ирбисту, юго-восток Горного Алтая: свидетельство HIMU-компонента в магматическом источнике // Доклады Академии наук. 2011. Т. 439 (5). С. 665–668.
- Крупчатников В.И., Врублевский В.В., Крук Н.Н. Раннемезозойские лампроиты и монзонитоиды юго-востока Горного Алтая: геохимия, Sr–Nd изотопный состав, источники расплавов // Геология и геофизика. 2015. Т. 56 (6). С. 1057–1079.
- Рассказов С.В., Брандт С.Б., Брандт И.С., Иванов А.В. Радионуклидная геохимия в задачах и примерах. Новосибирск: Изд-во ГЕО, 2005. 268 с.
- Сафонова И.Ю. Геохимическая эволюция внутримантийного океанического магматизма Палеоазиатского океана от позднего неопротерозоя до раннего кембрия // Петрология. 2008. Т. 16 (5). С. 527–547.
- Сафонова И.Ю., Симонов В.А., Буслов М.М., Ота Ц., Маруяма Ш. Неопротерозойские базальты Палеоазиатского океана из Курайского аккреционного клина (Горный Алтай): геохимия, петрогенезис, геодинамические обстановки формирования // Геология и геофизика. 2008. Т. 49 (4). С. 335–356.
- Сафонова И.Ю., Буслов М.М., Симонов В.А. и др. Геохимия, петрогенезис и геодинамическое происхождение базальтов из Катунского аккреционного комплекса Горного Алтая (Юго-Западная Сибирь) // Геология и геофизика. 2011. Т. 52 (4). С. 541–567.
- Armienti P., Gasperini D. Do we really need mantle components to define mantle composition? // Journal of Petrology. 2007. V. 48 (4). P. 693–709.

- Bi J.H., Ge W.C., Yang H. et al.** Geochronology, geochemistry and zircon Hf isotopes of the Dongfanghong gabbroic complex at the eastern margin of the Jiamusi Massif, NE China: Petrogenesis and tectonic implications // *Lithos*. 2015. V. 234/235. P. 27–46.
- Bo L., Bao-Fu H., Zhao X. et al.** The Cambrian initiation of intra-oceanic subduction in the southern Paleo-Asian Ocean: Further evidence from the Barleik subduction-related metamorphic complex in the West Junggar region, NW China // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2016. V. 123. P. 1–21.
- Condie K.C.** Mantle plumes and their record in Earth history. Cambridge : Cambridge Univ. Press, 2001. 305 p.
- Condie K.C.** High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? // *Lithos*. 2005. V. 79. P. 491–504.
- Dickin A.P.** Radiogenic isotope geology. N.Y. : Cambridge University Press, 2005. 492 p.
- Hart S.R.** A large scale isotope anomaly in the Southern Hemisphere mantle // *Nature*. 1984. V. 309. P. 753–757.
- Hart S.R., Hauri E.H., Oschmann L.A., Whitehead J.A.** Mantle plumes and entrainment: isotopic evidence // *Science*. 1992. V. 256. P. 517–520.
- Hofmann A.W.** Sampling mantle heterogeneity through oceanic basalts: isotopes and trace elements // *Treatise on Geochemistry*. Elsevier Ltd., 2003. V. 2. P. 61–101.
- Jackson M.G., Hart S.R., Koppers A.A.P., Staudigel H., Konter J., Blusztajn J., Kurz M., Russell M.A.** The return of subducted continental crust in Samoan lavas // *Nature*. 2007. V. 448. P. 684–687.
- Klemme S., O'Neill H. StC.** The near-solidus transition from garnet lherzolite to spinel lherzolite // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2000. V. 138. P. 237–248.
- Meibom A., Anderson D.L.** The statistical upper mantle assemblage // *Earth and Planetary Science Letters*. 2003. V. 217. P. 123–139.
- Niu Y., Wilson M., Humphreys E.R., O'Hara M.J.** A trace element perspective on the source of ocean island basalts (OIB) and fate of subducted ocean crust (SOC) and mantle lithosphere (SML) // *Episodes*. 2012. V. 35 (2). P. 310–327.
- Pearce J.A.** Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust // *Lithos*. 2008. V. 100. P. 14–48.
- Pilet S., Hernandez J., Sylvester P., Poujol M.** The metasomatic alternative for ocean island basalt chemical heterogeneity // *Earth and Planetary Science Letters*. 2005. V. 236. P. 148–166.
- Robinson J.A.C., Wood B.J.** The depth of the spinel to garnet transition at the peridotite solidus // *Earth and Planetary Science Letters*. 1998. V. 164 (1/2). P. 277–284.
- Saccani E.** A new method of discriminating different types of post-Archean ophiolitic basalts and their tectonic significance using Th–Nb and Ce–Dy–Yb systematics // *Geoscience Frontiers*. 2015. V. 6. P. 481–501.
- Safonova I.Yu., Sennikov N.V., Komiya T., Bychkova Y.V., Kurganskaya E.V.** Geochemical diversity in oceanic basalts hosted by the Zasukhinskaya accretionary complex, NW Russian Altai, Central Asia: Implications from trace elements and Nd isotopes // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2011. V. 42. P. 191–207.
- Stacey J.C., Kramers J.D.** Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model // *Earth and Planetary Science Letters*. 1975. V. 26. P. 207–221.
- Stracke A., Bizimis M., Salters V.J.M.** Recycling oceanic crust: Quantitative constraints // *Geochemistry Geophysics Geosystems*. 2003. V. 4 (3). DOI 10.1029/2001GC000223.
- Stracke A., Hofmann A.W., Hart S.R.** FOZO, HIMU, and rest of the mantle zoo // *Geochemistry, geophysics, geosystems*. 2005. V. 6 (5). P. 1–20.
- Sun S., McDonough W.F.** Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // *Magmatism in the ocean basins* / eds by A.D. Saunders, M.J. Norry. Geol. Soc. Spec. Publ., 1989. V. 42. P. 313–345.
- Wang K., Plank T., Walker J.D., Smith E.I.** A mantle melting profile across the Basin and Range, SW USA // *Journal of Geophysical Research*. 2002. V. 107 (B1). DOI: 10.1029/2001JB000209.
- Weaver B.L.** The origin of ocean island basalt end-member compositions: trace element and isotopic constraints // *Earth and Planetary Science Letters*. 1991. V. 104 (2–4). P. 381–397.
- Xu Y.G., Ma J.L., Frey F.A., Feigenson M.D., Liu J.F.** Role of lithosphere–asthenosphere interaction in the genesis of Quaternary alkali and tholeiitic basalts from Datong, western North China Craton // *Chemical Geology*. 2005. V. 224. P. 247–271.
- Zartman R.E., Doe B.R.** Plumbotectonics – the model // *Tectonophysics*. 1981. V. 75. P. 135–162.
- Zartman R.E., Haines S.M.** The plumbotectonic model for Pb isotopic systematics among major terrestrial reservoirs – A case for bi-directional transport // *Geochimica et cosmochimica acta*. 1988. V. 52. P. 1327–1339.
- Zindler A., Hart S.R.** Chemical geodynamics // *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 1986. V. 14. P. 493–571.

Авторы:

Врублевский Василий Васильевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, доцент кафедры динамической геологии, геолого-географический факультет, Томский государственный университет, Томск, Россия.
E-mail: vasvr@yandex.ru

Крупчатников Василий Иванович, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, геолого-географический факультет, Томский государственный университет, Томск, Россия

Гертнер Игорь Федорович, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры петрографии, геолого-географический факультет, Томский государственный университет, Томск, Россия

V.V. Vrublevskii, V.I. Krupchatnikov, I.F. Gertner

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

THE ROLE OF EARTH MANTLE IN THE DEVELOPMENT OF EARLY PALEOZOIC OCEANIC ISLANDS VOLCANISM (for the geochemical data of OIB from SE Altai Mountains)

In southeastern part of Gorny Altai (Irbistu River), high-Ti K-subalkaline basalts (TiO_2 3–4; $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 3,4–7,7 wt. %; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ up to 1,8–2,2) were found among Early Paleozoic metaflysch. Volcanics have similar level of enrichment in LILE and HFSE (Rb 30–40, Ba 240–377, Zr 350–485, Nb 55–100, REE 190–300 ppm), fractioning of lanthanides ($\text{La}/\text{Yb} \approx 12\text{--}14$), and number of indicator ratios (Nb/U 45–56; Th/La 0,11–0,13; Th/Nb 0,07–0,08; Rb/Nb 0,31–0,54; Ba/Nb 3–4,7; La/Nb 0,57–0,64) to derivatives of OIB magmatism with intraplate plume nature. Wide ranges of isotopic composition of Nd and Sr ($\epsilon_{\text{NdT}} 1,7\text{--}5,0$; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_T 0,7026\text{--}0,7039$, ϵ_{SrT} from -18 to $+0,1$) suggest heterogeneity of sources of mantle basalt melt and absence of its interaction with supracrustal material. Primary ratios of Pb isotopes ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 17,75–17,85, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 15,48–15,49, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 37,35–37,62) also indicate the above scenario. We are considering possibility of magma generation under conditions of PREMA mixing with EM 1, but without participation of HIMU component, which often initiates OIB volcanism. Distribution of LREE and HREE determined in the rocks could be caused by 7–8% equilibrium melting of standard garnet-bearing mantle lherzolite, which lead to generating of primary magma similar to middle OIB. Presence of insignificant amount of spinel in the source or mixing of peridotite with different composition is also possible.

Keywords: oceanic islands volcanism, geochemistry of trace elements and Nd-Sr-Pb isotopes, mantle, generation of basaltic magmas, Gorny Altai.

REFERENCES

- Volkova N.I., Stupakov S.I., Tret'yakov G.A., et al. Blueschists from the Uimon zone as evidence for Ordovician accretionary-collisional events in Gorny Altai // *Russian Geology and Geophysics*. 2005. V. 46(4). pp. 361–378.
- Vrublevskii V.V., Krupchatnikov V.I., Izokh A.E., Gertner I.F. The alkaline and carbonatitic rocks of Gorny Altai (Edel'veis complex) as indicators of Early Paleozoic plume magmatism in the Central Asian Fold Belt // *Russian Geology and Geophysics*. 2012. V. 53(8). pp. 721–735.
- Vrublevskii V.V., Kotelnikov A.D., Krupchatnikov V.I. Late Precambrian OIB Magmatism in the Kuznetsk Alatau, Siberia: Geochemical Features of the Kulbyurstyug Formation Volcanics // *Doklady Earth Sciences*. 2016. V. 469(2). pp. 807–810.
- Gusev A.I. *Metabasity Altaya, blizkie k mantiinym basal'toidam Dupal-anomalii* [Metabasites of Altai region are close to the mantle basaltoids Dupal-anomaly] // *Prirodnye resursy Gornogo Altaya*. 2014. V. 18 (1–2). pp. 13–23. In Russian
- Dobretsov N.L., Buslov M.M., Safonova I.Yu., Kokh D.A. Fragments of oceanic islands in the Kurai and Katun' accretionary wedges of Gorny Altai // *Russian Geology and Geophysics*. 2004. V. 45(12). pp. 1325–1348.
- Krupchatnikov V.I., Vrublevskii V.V., Gertner I.F., Krivchikov V.A. OIB-type basalts of the Irbistu River basin (Southeast Mountain Altai): evidence for the HIMU component in the magmatic source // *Doklady Earth Sciences*. 2011. V. 439(2). pp. 1127–1130.
- Krupchatnikov V.I., Vrublevskii V.V., Kruk N.N. Early Mesozoic lamproites and monzonitoids of southeastern Gorny Altai: geochemistry, Sr–Nd isotope composition, and sources of melts // *Russian Geology and Geophysics*. 2015. V. 56(6). pp. 825–843.
- Rasskazov S.V., Brandt S.B., Brandt I.S., Ivanov A.V. *Radioizotopnaya geologiya v zadachakh i primerakh* [Radiogenic isotope geology in problems and examples]. Novosibirsk: Academic Publishing House «GEO», 2005. 268 p. In Russian
- Safonova I.Yu. Geochemical evolution of intraplate magmatism in the Paleo-Asian Ocean from the Late Neoproterozoic to the Early Cambrian // *Petrology*. 2008. 2008. V. 16(5). pp. 492–511.
- Safonova I.Yu., Simonov V.A., Buslov M.M., et al. Neoproterozoic basalts of the Paleo-Asian Ocean (Kurai accretionary zone, Gorny Altai, Russia): geochemistry, petrogenesis, and geodynamics // *Russian Geology and Geophysics*. 2008. V. 49(4). pp. 254–271.
- Safonova I.Yu., Buslov M.M., Simonov V.A., et al. Geochemistry, petrogenesis and geodynamic origin of basalts from the Katun' accretionary complex of Gorny Altai (southwestern Siberia) // *Russian Geology and Geophysics*. 2011. V. 52(4). pp. 421–442.
- Armienti P., Gasperini D. Do we really need mantle components to define mantle composition? // *Journal of Petrology*. 2007. V. 48(4). pp. 693–709.
- Bi J.H., Ge W.C., Yang H., et al. Geochronology, geochemistry and zircon Hf isotopes of the Dongfanghong gabbroic complex at the eastern margin of the Jiamusi Massif, NE China: Petrogenesis and tectonic implications // *Lithos*. 2015. V. 234/235. pp. 27–46.
- Bo L., Bao-Fu H., Zhao X., et al. The Cambrian initiation of intra-oceanic subduction in the southern Paleo-Asian Ocean: Further evidence from the Barleik subduction-related metamorphic complex in the West Junggar region, NW China // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2016. V. 123. pp. 1–21.
- Condie K.C. *Mantle plumes and their record in Earth history*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2001. 305 p.
- Condie K.C. High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? // *Lithos*. 2005. V. 79. pp. 491–504.
- Dickin A.P. *Radiogenic isotope geology*. NY: Cambridge University Press, 2005. 492 p.
- Hart S.R. A large scale isotope anomaly in the Southern Hemisphere mantle // *Nature*. 1984. V. 309. pp. 753–757.
- Hart S.R., Hauri E.H., Oschmann L.A., Whitehead J.A. Mantle plumes and entrainment: isotopic evidence // *Science*. 1992. V. 256. pp. 517–520.
- Hofmann A.W. Sampling mantle heterogeneity through oceanic basalts: isotopes and trace elements // *Treatise on Geochemistry*. Elsevier Ltd., 2003. V. 2. pp. 61–101.

- Jackson M.G., Hart S.R., Koppers A.A.P., Staudigel H., Konter J., Blusztajn J., Kurz M., Russell M.A. The return of subducted continental crust in Samoan lavas // *Nature*. 2007. V. 448. pp. 684–687.
- Klemme S., O'Neill H. StC. The near-solidus transition from garnet lherzolite to spinel lherzolite // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2000. V. 138. pp. 237–248.
- Meibom A., Anderson D.L. The statistical upper mantle assemblage // *Earth and Planetary Science Letters*. 2003. V. 217. pp. 123–139.
- Niu Y., Wilson M., Humphreys E.R., O'Hara M.J. A trace element perspective on the source of ocean island basalts (OIB) and fate of subducted ocean crust (SOC) and mantle lithosphere (SML) // *Episodes*. 2012. V. 35(2). pp. 310–327.
- Pearce J.A. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust // *Lithos*. 2008. V. 100. pp. 14–48.
- Pilet S., Hernandez J., Sylvester P., Poujol M. The metasomatic alternative for ocean island basalt chemical heterogeneity // *Earth and Planetary Science Letters*. 2005. V. 236. pp. 148–166.
- Robinson J.A.C., Wood B.J. The depth of the spinel to garnet transition at the peridotite solidus // *Earth and Planetary Science Letters*. 1998. V. 164(1/2). pp. 277–284.
- Saccani E. A new method of discriminating different types of post-Archean ophiolitic basalts and their tectonic significance using Th–Nb and Ce–Dy–Yb systematics // *Geoscience Frontiers*. 2015. V. 6. pp. 481–501.
- Safonova I.Yu., Sennikov N.V., Komiya T., Bychkova Y.V., Kurganskaya E.V. Geochemical diversity in oceanic basalts hosted by the Zasukh'yevskiy accretionary complex, NW Russian Altai, Central Asia: Implications from trace elements and Nd isotopes // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2011. V. 42. pp. 191–207.
- Stacey J.C., Kramers J.D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model // *Earth and Planetary Science Letters*. 1975. V. 26. pp. 207–221.
- Stracke A., Bizimis M., Salters V.J.M. Recycling oceanic crust: Quantitative constraints // *Geochemistry Geophysics Geosystems*. 2003. V. 4(3). DOI 10.1029/2001GC000223.
- Stracke A., Hofmann A.W., Hart S.R. FOZO, HIMU, and rest of the mantle zoo // *Geochemistry, geophysics, geosystems*. 2005. V. 6(5). pp. 1–20.
- Sun S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // *Magmaism in the ocean basins* (Eds. Saunders A.D., Norry M.J.). *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 1989. V. 42. pp. 313–345.
- Wang K., Plank T., Walker J.D., Smith E.I. A mantle melting profile across the Basin and Range, SW USA // *Journal of Geophysical Research*. 2002. V. 107(B1). DOI 10.1029/2001JB000209.
- Weaver B.L. The origin of ocean island basalt end-member compositions: trace element and isotopic constraints // *Earth and Planetary Science Letters*. 1991. V. 104(2–4). pp. 381–397.
- Xu Y.G., Ma J.L., Frey F.A., Feigenson M.D., Liu J.F. Role of lithosphere–asthenosphere interaction in the genesis of Quaternary alkali and tholeiitic basalts from Datong, western North China Craton // *Chemical Geology*. 2005. V. 224. pp. 247–271.
- Zartman R.E., Doe B.R. Plumbotectonics – the model // *Tectonophysics*. 1981. V. 75. pp. 135–162.
- Zartman R.E., Haines S.M. The plumbotectonic model for Pb isotopic systematics among major terrestrial reservoirs – A case for bi-directional transport // *Geochimica et Cosmochimica acta*. 1988. V. 52. pp. 1327–1339.
- Zindler A., Hart S.R. Chemical geodynamics // *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 1986. V. 14. pp. 493–571.

Authors:

Vrublevskii Vassily V., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor, Department of Dynamic Geology, Faculty of Geology and Geography, Tomsk State University, Tomsk, Russia. E-mail: vasvr@yandex.ru

Krupchatnikov Vassily Iv., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Scientific Researcher, Faculty of Geology and Geography, Tomsk State University, Tomsk, Russia

Gertner Igor F., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Associate Professor Department of Petrography, Faculty of Geology and Geography, Tomsk State University, Tomsk, Russia