

ЭЛЕМЕНТЫ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ В БАЗАНИТАХ ЮЖНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ (первые данные)

А.Я. Медведев, А.А. Каримов, В.А. Беляев

Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия

Изучение поведения и распределения элементов платиновой группы (ЭПГ) в совокупности с другими данными необходимо для геодинамических построений. Для одного из крупных регионов России — Забайкалья — данные по ЭПГ практически отсутствуют. В настоящей работе приведены первые данные по содержанию и поведению элементов платиновой группы во внутриплитных кайнозойских щелочных базальтоидах Южного Забайкалья. Суммарные содержания ЭПГ составляют от 20 до 40 мкг/т. Спектр распределения элементов платиновой группы изученных базанитов сопоставим со спектром основных пород ОИВ, в том числе Гавайских островов, и пород крупных изверженных провинций — толеитовых базальтов Сибирской платформы и базальтоидов Западно-Сибирской плиты. На основе сходства распределения ЭПГ и внутриплитного положения базанитов Южного Забайкалья сделан вывод о формировании базанитовых расплавов под действием мантийного плюма.

Щелочные базальтоиды, ЭПГ, базаниты, плюм, Южное Забайкалье

PLATINUM GROUP ELEMENTS IN THE SOUTH TRANSBAIKALIAN BASANITES (first data)

A.Ya. Medvedev, A.A. Karimov, V.A. Belyaev

Study of the behavior and distribution of platinum group elements (PGE), along with other data, is necessary for geodynamic reconstructions. There are almost no PGE data for Transbaikalia, one of the large regions of Russia. This work presents the first data on the contents and behavior of PGE in the Cenozoic intraplate alkali basaltoids of southern Transbaikalia. The total PGE contents are 20–40 ppb. The PGE pattern of the studied basanites is similar to those of mafic OIB, including the Hawaiian ones, and rocks of large igneous provinces: tholeiitic basalts of the Siberian Platform and basaltoids of the West Siberian Plate. Based on this similarity and on the intraplate location of the South Transbaikalian basanites, we have concluded that the basanitic melts formed under mantle plume impact.

Alkali basaltoids, PGE, basanites, plume, southern Transbaikalia

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к элементам платиновой группы (ЭПГ) обусловлен несколькими причинами. Во-первых, эти элементы являются стратегическим сырьем. Во-вторых, их изучение позволяет строить петрологические модели и идентифицировать источники вещества магматических комплексов. В последние годы, в связи с развитием более прецизионных аналитических методов, интерес к ним еще более возрос.

Естественно, что большая часть исследований посвящена рудоносным объектам [Дистлер, 1994; Maier, Varnes, 2003; Varnes et al., 2006; Dare et al., 2010; Толстых и др., 2011; Singh, Manikyamba, 2020; и др.]. Также приводятся содержания ЭПГ в породах различных ультрамафит-мафитовых комплексов [Изох и др., 1991, 2010; Philips et al., 2001; Поляков и др., 2006; и др.]. Есть сведения о содержании платиноидов в базальтах различных геодинамических обстановок [Crockett, 2002; Woodland et al., 2002; Chazey III, Neal, 2005; Park et al., 2012; и др.], в том числе и в островодужных базальтах Камчатки [Иванов и др., 2008; Савельев и др., 2018]. Кроме того, есть данные о платиноидах в породах крупных изверженных провинций [Zhang et al., 2005; Isoh и др., 2010; Наставко и др., 2012; Колотилина и др., 2016; и др.]. В последние годы опубликованы сведения о содержании и поведении ЭПГ в ультраосновных и основных вулканитах крупнейших изверженных провинций: Сибирской платформы и Западной Сибири [Медведев, 2013; Isoh и др., 2016]. Достаточно крупный регион России — Южное Забайкалье является практически не изученным в отношении поведения и распределения ЭПГ в щелочных базальтоидах и вулканитах. В настоящей работе приведены первые данные по содержанию и поведению элементов платиновой группы в этих породах, позволяющие использовать их для геодинамического анализа.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ОТБОРА ПРОБ

В позднем кайнозое на южном обрамлении Сибирского кратона широко проявился вулканизм, продукты которого образовали ряд различных по размеру и продолжительности формирования полей [Новейший вулканизм..., 2008]. Практически во всех районах распространения вулканитов отмечается несколько этапов магматической деятельности, в общей сложности от 34 млн лет до исторического возраста [Ярмолюк и др., 1998, 2003, 2011]. Общим для всех регионов является преобладание лав основного состава, большая их часть относится к щелочному и субщелочному рядам. Основная часть проявлений кайнозойского вулканизма связана со структурами Байкальского рифта.

Одним из районов распространения кайнозойских вулканитов, не связанных с рифтогенезом, является Южное Забайкалье. Щелочные базальтоиды кайнозойского возраста, содержащие большое количество мантийных и коровых ксенолитов, достаточно давно известны в Южном Забайкалье на Дауро-Хэнтэйском хребте. Они распространены в виде небольших по площади и мощности потоков и покровов в верховьях рек Чикой и Чикокон. Первые сведения о них появились в работе Н.П. Костякова с соавторами [1969]. Нами исследованы вулканиты трех участков. Первый участок — Бороздинский гольец, вершина которого сложена плотными вулканитами серого и черного цвета. Второй и третий — это небольшие покровы, расположенные в устьях рек Харчевка и Жарничиха, являющихся притоками р. Буркал. На этих участках в основании потоков залегают вулканиты, аналогичные породам Бороздинского гольца. Местоположение изученных объектов показано на рис. 1, 2. Для изучения были отобраны образцы без видимых ксенолитов.

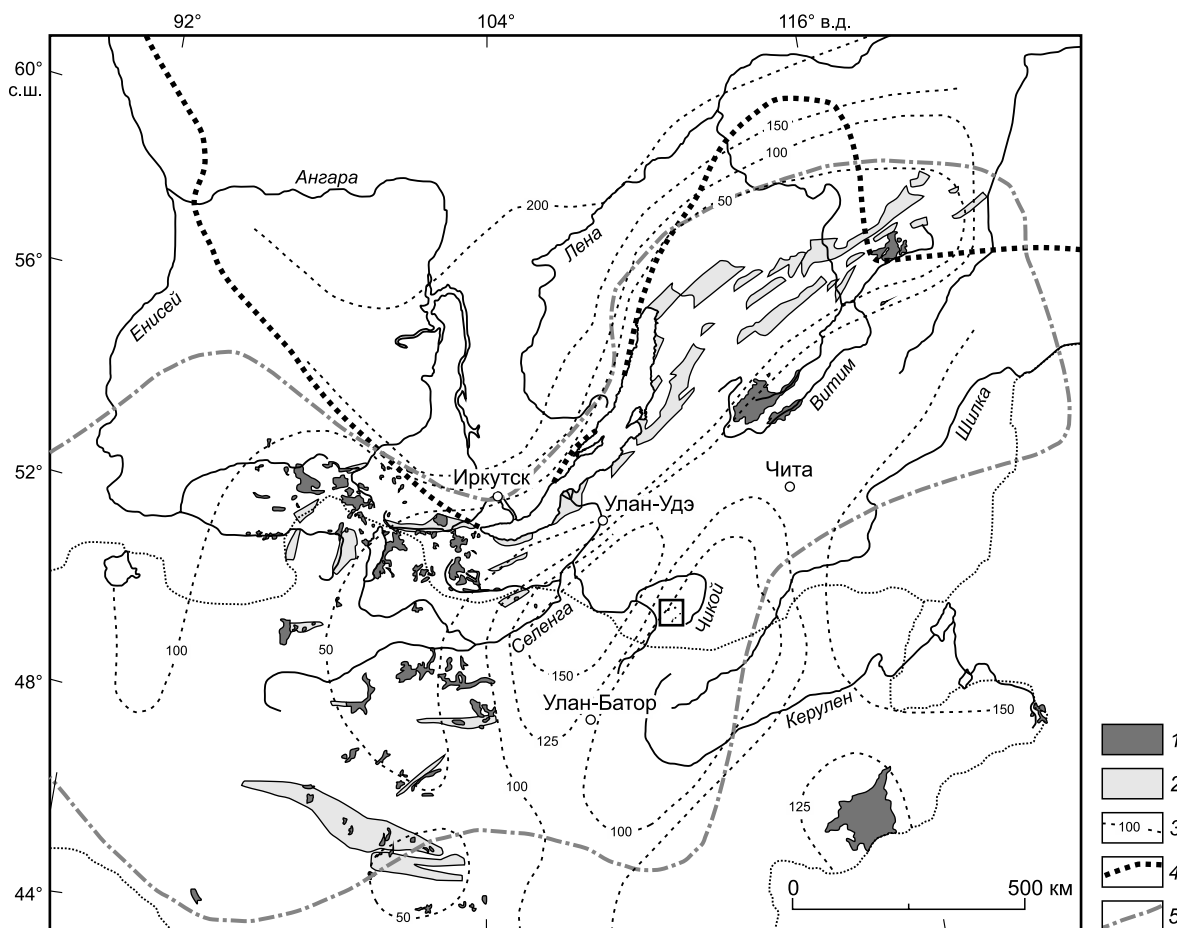


Рис. 1. Положение кайнозойских вулканитов в Байкало-Монгольском регионе [Litasov, Taniguchi, 2002].

1 — кайнозойские вулканические породы; 2 — кайнозойские осадочные бассейны и впадины; 3 — мощность литосферы (км), по [Zorin et al., 1990]; 4 — граница Сибирского кратона; 5 — граница распространения аномальной низкоскоростной мантии [Zorin, Rogozhina, 1978]. Расположение щелочных базальтоидов Дауро-Хэнтэйского хребта отмечено прямоугольником.

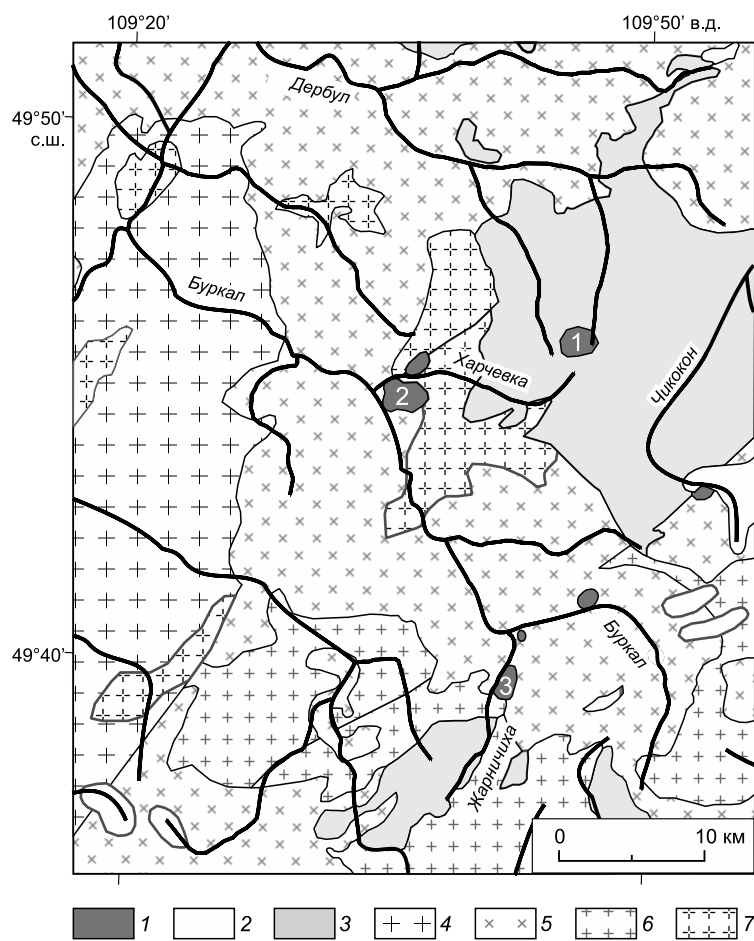


Рис. 2. Геологическая карта района распространения кайнозойских щелочных базальтов Дауро-Хэнтэйско-го хребта.

Фрагмент Государственной геологической карты РФ [Государственная..., 2012] с упрощениями и дополнениями. 1 — позднекайнозойские щелочные базальты; 2 — четвертичные флювиогляциальные отложения; 3 — каменноугольные отложения ингодинской серии; 4 — гранитоиды малханского комплекса (PZ_1); 5 — гранитоиды даурского комплекса (P_1); 6 — гранитоиды кыринского комплекса ($J_{1,2}$); 7 — гранитоиды асакан-шумиловского комплекса ($J_{2,3}$). Цифрами обозначены выходы кайнозойских щелочных базальтоидов: 1 — Бороздинский голец, 2 — Харчевка, 3 — Жарничиха.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Работа выполнена с использованием научного оборудования ЦКП «Изотопно-геохимические исследования» ИГХ СО РАН. Петрогенные элементы определялись рентгенофлуоресцентным методом, по [Амосова и др., 2015], на волново-дисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре S8-Tiger (Bruker AXS, Германия). Калибровка рентгенофлуоресцентного анализа проведена по стандартным образцам

СТ-1А (трапп, Россия) и JB-1 (базальт, Япония) [Финкельштейн и др., 1984]. Определение редких элементов производилось методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой с открытым кислотным разложением на масс-спектрометре с магнитным сектором ELEMENT-2 (Finnigan MAT, Германия) с двойной фокусировкой. Методики опубликованы в работах [Мысовская и др., 2009; Сайбаталова и др., 2010]. Содержания элементов платиновой группы (Ru, Rh, Pd, Pt, Ir, Os) определяли методом ИСП-МС на масс-спектрометре высокого разрешения ELEMENT-2 (Finnigan MAT) с использованием открытого кислотного разложения и отделением матричных элементов на катионите КУ-2-8, по [Меньшиков и др., 2016]. Правильность определения концентраций и дрейф прибора контролировали по стандартным образцам Ж-3, ПП-1 (Ru, Rh, Pd, Pt) и ЕСО-2 (Pd, Pt), а также Jp-1 (Япония), DZE-1 (Китай) — (Ru, Rh, Pd, Pt, Ir) [Меньшиков и др., 2016]. Значения пределов обнаружения, рассчитанные с учетом величины контрольного опыта и его стандартного отклонения (при переведении навески 1 г в 50 мл), составили (нг/г): для Ru — 0.13, Rh — 0.09, Pd — 1.40, Os — 0.02, Ir — 0.09, Pt — 1.00. Относительные ошибки, полученные при измерении стандартов, не превышают 10 %. Определение общей серы проведено по [Методика..., 2016].

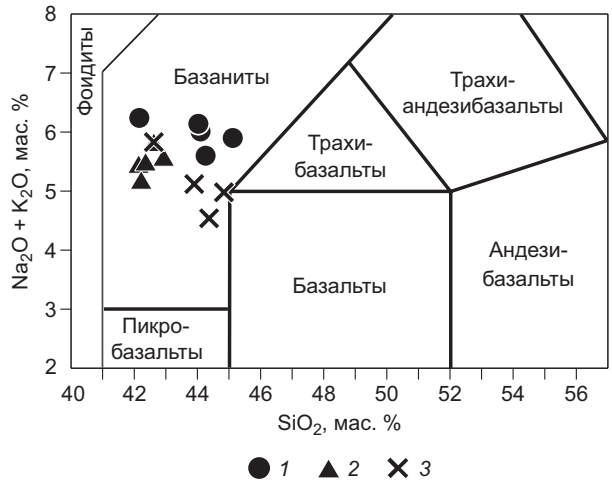
ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ ВУЛКАНИТОВ

Вулканиды представлены как порфировыми, так и мелкозернистыми афировыми разностями. Порфировость пород вызвана включениями в большей степени зерен оливина, реже клинопироксена. Афировые вулканиды сложены мелкими зернами оливина, табличками пироксена, табличками и тонкими лейстами плагиоклаза и мелкими зернами окисно-рудных минералов. В интерстициях отмечен калиевый полевой шпат, редко нефелин и отдельные зерна апатита. Во многих образцах присутствует остаточное стекло. Основная масса порфировых образцов такая же, как и в афировых разностях. Породы практически не затронуты вторичными изменениями. На это указывают низкие потери при прокаливании. По нашим данным, все изученные вулканиды относятся к базанитам (рис. 3). Предварительно отметим, что в породах не обнаружены сульфидные минералы и отмечены только единичные зерна хромшпинелидов [Боролдоева, Медведев, 2018].

Рис. 3. Диаграмма щелочность—кремнекислотность [Le Bas et al., 1986] для исследованных вулканитов Южного Забайкалья.

1 — Бороздинский голец, 2 — Харчевка, 3 — Жарничиха.

Данные о химическом составе приведены в табл. 1. Все породы являются низкокремнистыми (42—45 мас. % SiO_2), высокомагниевыми (11—16 мас. % MgO). Повышенная магниальность вызвана присутствием порфировых вкрапленников оливина как фенокристов, так и ксенокристов. Ксенокристы, по имеющимся данным, являются реликтами оливина глубинных включений с магниальностью $\geq \text{Fo}_{90-91}$ [Боролдоева, Медведев, 2018]. Исследованные породы высокощелочные, сумма щелочей составляет от 4.50 до 6.25 мас. %, при этом наблюдается превышение натрия над калием. Содержания общей серы очень низкие, в большинстве случаев ниже предела обнаружения. Изученные базальтоиды имеют повышенные концентрации HFSE (Nb, Ta), РЗЭ. Значения индикаторных редкоэлементных отношений составляют $\text{Ba}/\text{Nb} = 5.71\text{—}7.30$; $\text{Nb}/\text{Zr} = 0.29\text{—}0.33$, что хорошо соответствует таковым в базальтах океанических островов. График распределения РЗЭ подтверждает отнесение базанитов к породам ОИВ (рис. 4).



ЭЛЕМЕНТЫ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ

Содержание элементов платиновой группы приведено в табл. 2. Суммы ЭПГ в изученных породах достаточно различаются, от 20 до 40 мкг/т. Наблюдается невысокая степень фракционирования ($\text{Pd}/\text{Ir} = 0.21\text{—}4.1$) (рис. 5). На рисунке 6 показано распределение ЭПГ в вулканитах, нормированное к хондриту CI [Horan et al., 2003]. Все полученные данные отражают обогащение Pt и Pd относительно Os, Ir, Rh и Ru. Почти для всех ЭПГ не наблюдается каких-либо значимых зависимостей от содержания как петрогенных, так и редких элементов (рис. 7).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Элементы платиновой группы делятся на две триады: легкие платиноиды — рутений, родий, палладий и тяжелые — осмий, иридий, платина. Кроме того, эти же элементы разделяются на группы по степени плавления элементов: иридиевая (Ir, Os, Ru) с температурой плавления выше 2000 °С и платиновая (Pt, Pd, Rh) с температурой плавления ниже 2000 °С. Большинство платиноиды рассеяны в ультраосновных и основных породах. Но при этом существует более 100 их минералов. Чаще всего они образуют соединения со многими металлами, в том числе и между собой. Известны твердые растворы платиноидов, такие как Os-Ir-Ru сплавы. Кроме того, существуют арсениды, сульфиды, сульфиды и теллуриды ЭПГ, а также висмутиды, антимониды, станиды, плумбиды и др., в том числе многочисленные промежуточные соединения. Все элементы платиновой группы практически не входят в кристаллическую решетку породообразующих силикатных минералов. Повышенные концентрации платиноидов отмечаются в сульфидах либо как включения интерметаллидов, либо как включения соединений ЭПГ с многими элемен-

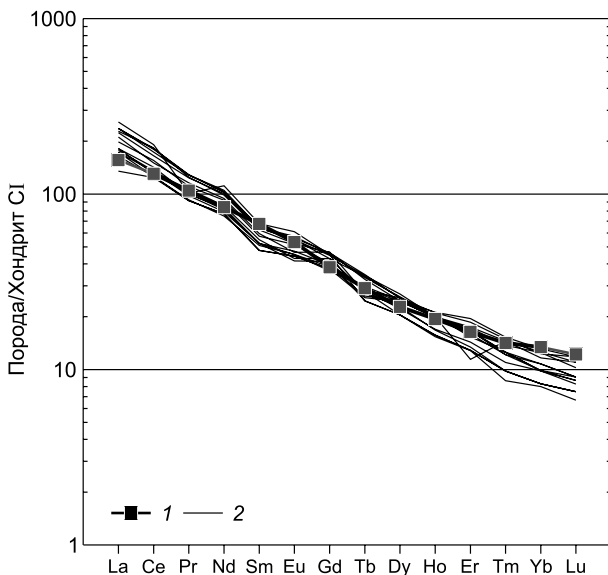


Рис. 4. Распределение РЗЭ в вулканитах, нормированное к хондриту CI [Horan et al., 2003].

1 — ОИВ [Sun, McDonough, 1989]; 2 — базаниты Южного Забайкалья, наши данные.

Таблица 1.

Химический (мас. %) и редкоземельный (г/т) составы базанитов

Ком- по- нент	101	106-2	106-3	106-9	106-11	110	111	114	118	119	14-12	14-06	14-11-2	14-24	14-B
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
SiO ₂	44.26	44.10	45.12	42.16	44.03	42.14	42.22	42.93	42.36	42.62	44.84	43.90	44.84	44.37	43.96
TiO ₂	2.88	3.27	2.79	3.10	3.09	2.49	2.47	2.57	2.57	2.57	2.12	2.76	2.42	2.11	2.57
Al ₂ O ₃	12.46	11.71	11.46	12.43	11.56	10.48	10.30	10.71	10.62	10.99	11.86	11.98	11.86	11.55	12.04
Fe ₂ O ₃ *	13.30	13.46	12.92	14.04	13.20	13.51	13.87	13.93	13.74	13.61	12.25	11.39	11.28	12.62	11.47
MnO	0.17	0.16	0.16	0.18	0.16	0.18	0.18	0.19	0.19	0.18	0.19	0.19	0.19	0.19	0.18
MgO	11.13	12.55	12.16	10.57	12.14	16.04	15.76	14.53	15.72	15.34	14.02	13.56	14.02	14.63	12.84
CaO	8.80	8.32	8.33	10.42	8.14	9.06	9.62	9.68	9.16	9.13	9.32	9.83	9.32	9.51	9.81
Na ₂ O	3.26	3.51	3.42	3.86	3.44	3.66	3.41	3.67	3.67	3.83	3.54	3.72	3.54	3.21	3.79
K ₂ O	2.34	2.50	2.48	2.38	2.70	1.80	1.78	1.91	1.83	2.00	1.44	1.40	1.44	1.33	1.67
P ₂ O ₅	0.68	0.76	0.67	0.80	0.75	0.87	0.83	0.82	0.86	0.90	0.61	0.76	0.61	0.65	0.65
П.п.п.	1.53	0.11	0.31	0.15	0.13	0.20	0.32	0.01	0.07	0.12	0.24	0.26	0.24	0.16	0.25
S _{общ.}	<0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.02	<0.02	0.02	<0.02	<0.02	0.02	<0.02
Сумма	100.82	100.48	99.85	100.11	100.57	100.23	100.76	100.95	100.81	101.29	100.45	99.75	99.76	100.35	99.23
Sc	19	16	17	17	16	19	18	19	19	17	26	27	26	27	25
V	189	228	229	207	194	180	189	191	182	169	218	225	218	224	228
Cr	323	334	370	149	290	627	609	477	561	519	1369	958	1022	979	729
Co	55	68	67	57	61	66	65	64	65	61	67	68	67	70	64
Ni	269	375	387	165	397	547	519	454	514	475	674	538	490	615	484
Rb	46	67	76	53	75	40	40	42	39	40	30	26	32	27	32
Sr	834	942	863	1082	995	993	963	977	963	994	756	828	685	806	799
Y	26	24	24	28	26	29	29	29	29	29	27	32	29	30	29
Zr	235	257	246	310	274	265	254	265	262	255	210	238	210	197	217
Nb	70	88	78	97	95	85	83	81	87	80	65	78	65	64	71
Ba	514	610	596	669	674	526	513	549	519	561	443	441	412	441	479
La	43	42	43	61	50	56	53	56	54	56	32	47	39	41	41
Ce	87	83	80	117	92	111	101	106	112	110	76	95	77	82	77
Pr	9.45	9.90	9.60	13.22	11.00	12.25	11.74	12.18	11.85	12.20	8.70	10.50	8.70	9.30	8.80
Nd	39	40	38	52	44	48	47	48	46	49	36	43	36	37	35
Sm	7.99	8.40	8.00	10.37	9.10	9.91	9.77	9.81	9.56	9.86	7.30	8.80	7.30	8.00	7.80
Eu	2.74	2.49	2.41	3.54	2.70	3.26	3.19	3.19	3.03	3.33	2.57	2.99	2.57	2.62	2.63
Gd	8.11	8.80	8.50	9.29	9.60	9.49	8.81	9.18	9.54	9.34	7.70	8.30	7.70	7.50	7.90
Tb	1.05	1.04	0.92	1.25	1.02	1.30	1.27	1.28	1.22	1.25	1.08	1.06	0.96	1.11	0.98
Dy	5.65	5.20	5.20	6.49	5.80	6.46	6.52	6.84	6.24	6.60	6.20	6.50	6.20	6.30	6.30
Ho	0.96	0.87	0.89	1.09	0.95	1.14	1.10	1.13	1.13	1.14	1.13	1.19	1.13	1.20	1.11
Er	2.37	2.12	2.13	2.49	2.22	2.73	2.63	2.76	2.76	2.54	1.89	3.08	2.89	3.23	2.85
Tm	0.28	0.22	0.25	0.29	0.25	0.32	0.31	0.32	0.31	0.32	0.37	0.38	0.37	0.39	0.35
Yb	1.67	1.36	1.41	1.54	1.41	1.83	1.68	1.68	1.83	1.67	1.98	2.09	2.14	2.23	2.12
Lu	0.21	0.17	0.19	0.21	0.19	0.23	0.22	0.23	0.23	0.22	0.28	0.30	0.28	0.30	0.26
Ta	3.98	5.70	5.30	5.80	6.30	4.87	4.63	4.97	4.80	5.02	3.59	4.30	3.59	3.48	3.75
Hf	5.30	5.40	5.50	6.78	6.20	5.61	5.65	5.91	5.49	5.78	3.93	6.81	3.93	3.85	4.06
Pb	2.88	4.57	4.57	3.41	4.25	2.82	2.90	2.78	2.85	2.80	2.84	2.86	2.84	3.09	2.29
Th	6.12	7.10	7.30	8.97	8.00	7.75	7.52	7.72	7.72	8.01	5.10	5.21	4.88	5.30	5.07
U	1.41	1.64	1.93	2.03	1.85	1.82	1.80	1.79	1.79	1.85	1.32	1.52	1.33	1.36	1.38

Примечание. Аналитики: В.И. Ложкин, Н.Н. Пахомова, А.Л. Финкельштейн. Fe₂O₃* — железо общее. Пробы 1—5 — р. Жарничиха, 6—10 — р. Харчевка, 11—15 — Бороздинский голец.

Таблица 2. Содержание элементов группы платины (мкг/т) в базанитах Южного Забайкалья

№ обр	Ru	Rh	Pd	Os	Ir	Pt	ΣЭПГ
101	0.66	0.19	0.27	2.03	0.54	16.61	20.30
106-2	0.58	0.19	0.63	1.14	0.58	36.68	39.80
106-3	0.68	0.16	0.71	0.87	0.48	34.12	37.02
106-9	0.32	0.19	0.87	0.46	0.21	19.30	21.35
106-11	0.48	0.11	0.40	0.78	0.37	34.47	36.61
110	0.69	0.19	0.30	0.56	0.32	21.02	23.08
111	0.69	0.15	0.26	0.49	0.44	34.46	36.49
114	0.67	0.27	0.19	0.39	0.29	33.06	34.87
118	0.88	0.16	0.15	0.33	0.25	37.41	39.18
119	0.86	0.12	0.10	0.35	0.22	30.38	32.03
14-12	0.70	0.28	0.10	0.24	0.47	31.66	33.45
14-06	0.69	0.25	0.17	0.43	0.43	21.27	23.24
14-11-2	0.47	0.21	0.19	0.24	0.24	20.05	21.40
14-24	0.42	0.24	0.23	0.26	0.26	20.55	21.96
14-B	0.51	0.18	0.25	0.28	0.28	20.47	21.97

Примечание. Аналитики: В.И. Меньшиков, В.Н. Власова, В.И. Ложкин, Ю.В. Сокольников.

тами. Также существуют сульфиды платины (куперит — PtS) и рутения (лаурит RuS, осмиевый лаурит (RuOs)S₂). В хромитах тугоплавкие элементы (Ir, Os, Ru) могут входить изоморфно, а платина в виде микроскопических включений.

Данные по содержаниям ЭПГ в базальтоидах различных геодинамических обстановок (см. рис. 6) показывают, что наименьшая концентрация отмечается в базальтах срединно-океанических хребтов (N-MORB), а наибольшая в породах OIB. При этом содержание платиноидов в толеитах OIB несколько выше [Ireland et al., 2009], чем в щелочных базальтах океанических островов [Day et al., 2010]. Базальты островных дуг (IAB) занимают промежуточное положение [Иванов и др., 2008]. Считается, что обогащение ЭПГ базальтов островных дуг по сравнению с N-MORB объясняется процессом переноса платиноидов водным флюидом из субдуцирующего слэба [Иванов и др., 2008]. По данным исследования содержания ЭПГ в мантийных расплавах и мантийных породах, таких как гарцбургиты и лерцолиты, сделан вывод о сульфидном контроле как главном определяющем факторе содержания элементов платиновой группы в расплаве [Barnes et al., 2015; и др.]. Коэффициенты распределения ЭПГ между сульфидным и силикатным расплавами составляют 10⁵—10⁶ [Mungall, Brenan, 2014]. Следовательно, распределение элементов платиновой группы в магмах практически полностью контролируется содержанием их в сульфидах. Таким образом, можно сделать вывод, что на ранних этапах магмогенеза ЭПГ ведут себя как несовместимые с оливином и хромшпинелидом. В отсутствие фаз концентраторов, таких как сульфиды, что наблюдается в наших породах, небольшая часть ЭПГ рассеивается в силикатном расплаве в виде микропримесей сульфидов, так как содержание серы в наших вулканитах очень низкое (см. табл. 1). Кроме того, ЭПГ могут частично концентрироваться в окисно-рудных фазах, таких как магнетит или хромит. Следует заметить, что коэффициенты распределения расплав—минерал для платины в магнетите (3) и хромите (3.3) выше, чем таковые у палладия (1.1 для магнетита и 1.6 для хромита) [Carobianco et al., 1994; Puchtel, Humaun, 2001].

Степень накопления элементов платиновой группы в силикатном расплаве зависит от степени частичного плавления: до 20 % частичного плавления мантии в рестите сохраняются сульфиды, а после — они начинают переходить в расплав [Barnes et al., 2015]. Для щелочных базальтов Гавайских островов степень частичного плавления была определена по содержанию палладия и иридия [Barnes, Maier, 1999]. Изученные нами базаниты по петрогенному и редкоэлементному составу наиболее близки к ще-

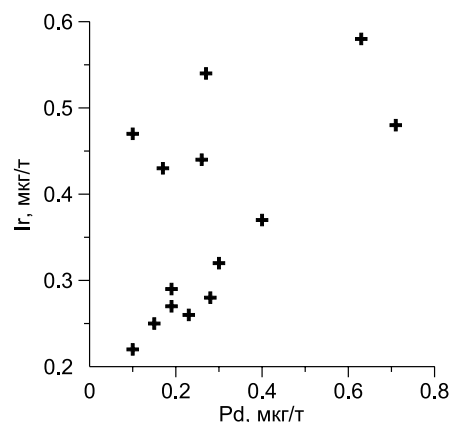


Рис. 5. Зависимость содержания Ir от концентрации Pd.

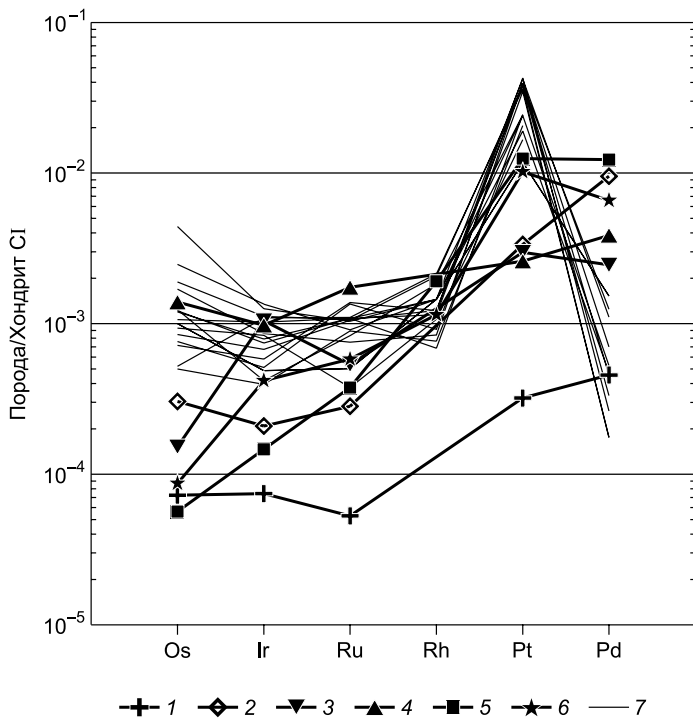


Рис. 6. Распределение ЭПГ в вулканитах, нормированное к хондриту CI [Horan et al., 2003].

1 — щелочные толеиты Гавайских островов [Ireland et al., 2009]; 2 — толеитовые базальты Сибирской платформы [Изох и др., 2016]; 3 — базальтоиды Западно-Сибирской плиты [Медведев, 2013]; 4 — MORB [Bezous et al., 2005; Day, 2013]; 5 — IAB [Иванов и др., 2008]; 6 — щелочные базальты Гавайских островов [Day et al., 2010]; 7 — базаниты Южного Забайкалья, наши данные.

лочным базальтам Гавайских островов, поэтому можно использовать полученные данные [Barnes, Maier, 1999] для определения степени частичного плавления субстрата базанитов Южного Забайкалья. В этой же работе показано, что при генерировании толеитовых расплавов концентрация ЭПГ в них выше, чем в щелочно-базальтовых. Содержание Pd в базанитах меняется от 0.10 до 0.87 мкг/т, иридия от 0.17 до 0.58 мкг/т (см. табл. 2), а отношение Pd/Ir составляет 0.21—4.1 (см. рис. 5), что сопоставимо с базальта-

ми Гавайских островов [Tatsumi et al., 1999]. Таким образом, можно сделать вывод, что степень частичного плавления мантийного субстрата не превышала 8%. Нами была предпринята попытка рассмотреть концентрирование ЭПГ в исследованных базанитах. В случае невысокой степени плавления, что отмечается в данном случае, только небольшая часть платиноидов попадает в образующийся силикатный расплав. В зону магмообразования возможно вовлечение типичной субконтинентальной литосферы, содержащей сульфиды. В связи с большими величинами коэффициентов распределения ЭПГ в системе сульфидный—силикатный расплавы, как было показано выше, сульфидные фазы экстрагируют платиноиды из силикатного расплава. Так как сульфидные минералы в базанитах не отмечены, такой вариант представляется маловероятным.

В случае присутствия окисно-рудной фазы ЭПГ могут концентрироваться в хромшпинелидах либо в магнетитах. Коэффициенты распределения для тугоплавких платиноидов, таких как Ru, Rh и Ir, в хромшпинелидах составляют от 50 до 100 [Puchtel, Humayun, 2001]. Кроме того, следует отметить, что большая часть тугоплавких платиноидов при плавлении остается в рестите. Однако в связи с единичными зернами хромшпинели в изученных породах этот минерал не играет существенной роли в содержании платиноидов. Можно предположить, что ЭПГ, растворенные в силикатном расплаве, в процессе кристаллизации концентрируются в титаномagnetите. При этом содержание платины в минерале выше, чем палладия, как это следует из коэффициентов распределения элементов [Carobianco et al., 1994; Puchtel, Humayun, 2001].

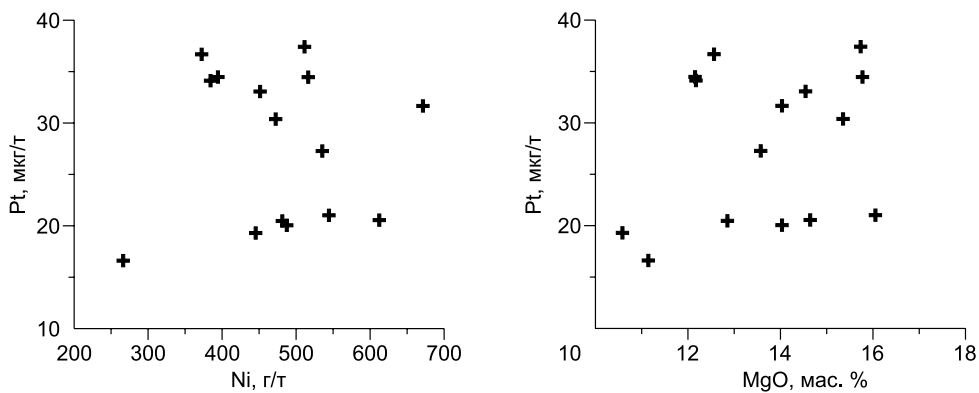


Рис. 7. Зависимость концентраций Pt от содержания Ni и MgO.

Полученные нами данные показывают, что концентрации платиноидов несколько выше, чем кларковые содержания для основных пород [Day, 2013]. Спектр распределения элементов платиновой группы изученных базанитов сопоставим с породами ОИВ и породами крупных изверженных провинций: толеитовыми базальтами Сибирской платформы и базальтоидами Западно-Сибирской плиты [Медведев, 2013; Изох и др., 2016]. Особенно близко содержание ЭПГ к таковым в щелочных базальтах Гавайских островов [Day et al., 2010]. Отличие состоит в пониженных концентрациях палладия (см. рис. 5). Подобные спектры распределения платиноидов с низкими содержаниями палладия отмечены в вулканиках Онтонг-Джава [Ely, Neal, 2003] и некоторых базальтах офиолитового комплекса Камчатки [Савельев и др., 2018]. Это объясняется тем, что при низких степенях плавления сульфидная фаза остается в субстрате и вместе с ней большая часть палладия также остается в субстрате. Кроме того, как показано выше, платина предпочтительнее входит в титаномагнетит по сравнению с палладием.

Для базальтов Гавайских островов показана их связь с Гавайским плюмом [Portnyagin et al., 2008; Day, 2013]. Также предполагается влияние вещества плюма на содержание платиноидов при формировании базальтов Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты в области головки плюма [Медведев, 2013; Изох и др., 2016]. Особенно четко это проявлено для базальтов Западной Сибири, в которых повышенные концентрации ЭПГ отмечены под центральными частями рифтовых зон, где плюм подходил наиболее близко к поверхности [Добрецов, 1997, 2008; Медведев, 2013]. Механизм взаимодействия плюма с вышележащими породами до конца не ясен. Полученные нами данные по поведению и распределению платиноидов и сравнение их с данными по другим объектам позволяют утверждать, что формирование базанитовых расплавов происходило при воздействии плюмового вещества. Ранее для этих базанитов допускалась возможность формирования под действием мантийного диапира [Ащепков и др., 1996; Litasov, Tiniguchi, 2002].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены первые данные по содержанию элементов платиновой группы в базанитах Южного Забайкалья.

Концентрации ЭПГ соответствуют таковым в щелочных базальтах Гавайских островов, в толеитовых базальтах Сибирской платформы и базальтоидах Западно-Сибирской плиты.

Сделан вывод о влиянии вещества плюма при формировании базанитовых расплавов.

Работа выполнена с использованием научного оборудования ЦКП «Изотопно-геохимические исследования» ИГХ СО РАН.

Исследование проведено в рамках выполнения государственного задания по проекту № 0350-2019-0008 и при финансовой поддержке гранта РФФИ 20-05-00116.

ЛИТЕРАТУРА

Амосова А.А., Пантеева С.В., Татаринов В.В., Чубаров В.М., Финкельштейн А.Л. Рентгенофлуоресцентное определение основных пороодообразующих элементов из образцов массой 50 и 110 мг // Аналитика и контроль, 2015, т. 19, № 2, с. 130—138.

Ащепков И.В., Литасов Ю.Д., Литасов К.Д. Ксенолиты гранатовых перидотитов из меланонефелинитов хребта Хэнтэй (Южное Забайкалье): свидетельство подъема мантийного диапира // Геология и геофизика, 1996, т. 37 (1), с. 130—147.

Боролдоева В.В., Медведев А.Я. Минералогия щелочных пикробазальтов хребта Хэнтэй (Южное Забайкалье) // Известия Сибирского отделения. Секция наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых, 2018, т. 4, № 1, с. 66—78.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист М-49 — Петровск-Забайкальский. Объяснительная записка. СПб, Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2012, 438 с.

Дистлер В.В. Платиновая минерализация норильских месторождений // Геология и генезис платиновых металлов. М., Наука, 1994, с. 7—35.

Добрецов Н.Л. Пермотриасовый магматизм в Евразии как отражение суперплюма // ДАН, 1997, т. 354, № 2, с. 220—223.

Добрецов Н.Л. Геологические следствия термохимической модели плюмов // Геология и геофизика, 2008, т. 49 (7), с. 587—604.

Иванов А.В., Перепелов А.Б., Палесский С.В., Николаева И.В. Первые данные по распределению элементов платиновой группы (Ir, Os, Ru, Pt, Pd) в островодужных базальтах Камчатки // ДАН, 2008, т. 420, № 1, с. 92—96.

Изох А.Э., Поляков Г.В., Аношин Г.Н., Голованова Н.П. Геохимия платиновых металлов, золота и серебра в Номгонском троктолит-анортозит-габбровом массиве (МНР) // Геохимия, 1991, № 10, с. 114—117.

Изох А.Э., Вишневский А.В., Поляков Г.В., Калугин В.М., Оюунчимэг Т., Шелепаев Р.Н., Егорова В.В. Урэгнурская платиноносная вулканоплутоническая пикрит-базальтовая ассоциация Монгольского Алтая — индикатор кембро-ордовикской крупной изверженной провинции // Геология и геофизика, 2010, т. 51 (5), с. 665—681.

Изох А.Э., Медведев А.Я., Федосеев Г.С., Поляков Г.В., Николаева И.В., Палесский С.В. Распределение элементов платиновой группы в пермотриасовых базальтах Сибирской крупной изверженной провинции // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (5), с. 1028—1042, doi: 10.15372/GiG20160512.

Колотилина Т.Б., Мехоношин А.С., Орсов Д.А. Распределение элементов платиновой группы в сульфидных рудах ультрабазитовых массивов центральной части Восточного Саяна (юг Сибири, Россия) // Геология рудных месторождений, 2016, т. 58, № 1, с. 23—40.

Костяков Н.П., Краснов В.П., Уфимцев Г.Ф., Янковский В.М. Кайнозойские базальты юга Центрального Забайкалья // Известия Забайкальского географического общества СССР, 1969, т. V, вып. 1, с. 11—17.

Медведев А.Я. Элементы платиновой группы в пермотриасовых вулканитах Западной Сибири (первые данные) // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (7), с. 867—875.

Меньшиков В.И., Власова В.Н., Ложкин В.И., Сокольников Ю.В. Определение элементов платиновой группы в горных породах методом ИСП-МС с внешней градуировкой после отделения матричных элементов на катионите КУ-2-8 // Аналитика и контроль, 2016, т. 20, № 3, с. 190—201.

Методика НППМ №3 «Определение общей серы в горных породах, рудах и продуктах их переработки гравиметрическим методом». М., ВИМС, 2016, 9 с.

Мысовская И.Н., Смирнова Е.В., Ложкин В.И., Пахомова Н.Н. Новые данные по определению редких и рассеянных элементов в геологических стандартных образцах методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2009, № 10, с. 60—66.

Наставко А.В., Бородина Е.В., Изох А.Э. Петролого-минералогические особенности вулканитов центральной части Кузбасса (Южная Сибирь) // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (4), с. 435—449.

Новейший вулканизм Северной Евразии: закономерности развития, вулканическая опасность, связь с глубинными процессами и изменениями природной среды и климата // Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. В 8 томах / Ред. Н.П. Лавров. М., ИГЕМ РАН, ИФЗ РАН, 2008, т. 2, 280 с.

Поляков Г.В., Изох А.Э., Кривенко А.П. Платиноносные ультрамафит-мафитовые формации подвижных поясов Центральной и Юго-Восточной Азии // Геология и геофизика, 2006, т. 47 (12), с. 1227—1241.

Савельев Д.П., Палесский С.В., Портнягин М.В. Элементы платиновой группы в базальтах офиолитового комплекса п-ова Камчатский мыс (Восточная Камчатка): источники вещества // Геология и геофизика, 2018, т. 59 (12), с. 1997—2010.

Сайбаталова Е.В., Куликова Н.Н., Сутурин А.Н., Парадина Л.Ф., Пахомова Н.Н., Воднева Е.Н., Семитуркина Н.А. Влияние способов пробоподготовки на результаты определения элементного состава пресноводных губок методом ИСП-МС // Журнал аналитической химии, 2010, т. 65, № 7, с. 691—698.

Толстых Н.Л., Телегин Ю.М., Козлов А.П. Коренная платина Светлоборского и Каменушинского массивов платиноносного пояса Урала // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (6), с. 775—793.

Финкельштейн А.Л., Гуничева Т.Н., Афонин В.П. Учет матричных эффектов методом альфа-коррекции при рентгенофлуоресцентном анализе // Журнал аналитической химии, 1984, т. 39, № 3, с. 397—404.

Ярмолюк В.В., Иванов В.Г., Коваленко В.И. Источники внутриплитного магматизма Западного Забайкалья в позднем мезозое—кайнозое (на основе геохимических и изотопных данных) // Петрология, 1998, т. 6, № 2, с. 115—139.

Ярмолюк В.В., Иванов В.Г., Коваленко В.И., Покровский Б.Г. Магматизм и геодинамика Южно-Байкальской вулканической области (горячей точки мантии) по результатам геохронологических, геохимических и изотопных (Sr, Nd, O) исследований // Петрология, 2003, т. 11, № 1, с. 3—34.

Ярмолюк В.В., Кудряшова Е.А., Козловский А.М., Саватенков В.М. Позднекайнозойская вулканическая провинция Центральной и Восточной Азии // Петрология, 2011, т. 19, № 4, с. 341—362.

Barnes S.-J., Maier W.D. The fractionation of Ni, Cu and the noble metals in silicate and sulphide liquids // Dynamic processes in magmatic ore deposits and their application to mineral exploration / Eds. R.R. Keays, C.M. Lesher, P.C. Lightfoot, C.E.G. Farrow. Geol. Assoc. Can., Short Course Notes, 1999, v. 13, p. 69—106.

Barnes S.-J., Cox K.A., Zientek M.L. Platinum-group element, gold, silver and base metal distribution in compositionally zoned Medvezky Creek mine, Noril'sk, Russia // *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2006, v. 152 (1), p. 187—200.

Barnes S.-J., Mungall J.E., Maier W.D. Platinum group elements in mantle melts and mantle samples // *Lithos*, 2015, v. 232, p. 395—417.

Bézos A., Lorand J.-P., Humler E., Gros M. Platinum-group element systematics in Mid-Oceanic Ridge basaltic glasses from the Pacific, Atlantic, and Indian Oceans // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2005, v. 69 (10), p. 2613—2627.

Capobianco C.J., Hervig R.L., Drake M.J. Experiments on crystal/liquid partitioning of Ru, Rh and Pd for magnetite and hematite solid solutions crystallized from silicate melt // *Chem. Geol.*, 1994, v. 113, p. 23—43.

Chazey III W.J., Neal C.R. Platinum-group element constraints on source composition and magma evolution of the Kerguelen Plateau using basalts from ODP Leg 183 // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2005, v. 69 (12), p. 4685—4701.

Crocket J.H. Platinum-group elements in basalts from Maui, Hawai'i: low abundances in alkali basalts // *Can. Mineral.*, 2002, v. 40, p. 595—609.

Dare S.A.S., Barnes S.J., Prichard H.M. The distribution of platinum group elements (PGE) and other chalcophile elements among sulfides from the Creighton Ni–Cu–PGE sulfide deposit, Sudbary, Canada, and the origin of palladium in pentlandite // *Miner. Deposita*, 2010, v. 45, p. 765—793.

Day J.M.D. Hotspot volcanism and highly siderophile elements // *Chem. Geol.*, 2013, v. 341, p. 50—74.

Day J.M.D., Pearson D.G., Macpherson C.G., Lowry D., Carracedo J.C. Evidence for distinct proportions of subducted oceanic crust and lithosphere in HIMU-type mantle beneath El Hierro and La Palma, Canary Islands // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2010, v. 74, p. 6565—6589.

Ely J.C., Neal C.R. Using platinum-group elements to investigate the origin of the Ontong Java Plateau, SW Pacific // *Chem. Geol.*, 2003, v. 196, p. 235—257.

Horan M.F., Walker R.J., Morgan J.W., Grossman J.N., Rubin A.E. Highly siderophile elements in chondrites // *Chem. Geol.*, 2003, v. 196, p. 27—42.

Ireland T.J., Walker R.J., Garcia M.O. Highly siderophile element and ¹⁸⁷Os isotope systematics of Hawaiian picrites: Implications for parental melt composition and source heterogeneity // *Chem. Geol.*, 2009, v. 260, p. 112—128.

Le Bas M.J., Lemaitre R.W., Streckeisen A., Zanettin B.A. A chemical classification of volcanic rocks based on the total-alkali silica diagram // *J. Petrol.*, 1986, v. 27 (3), p. 745—750.

Litasov K., Tiniguchi H. Mantle evolution beneath the Baikal rift. CNEAS Monograph Series 5. Tohoku University, Sendai, 2002, 221 p.

Maier W.D., Barnes S.-J. Platinum-group elements in the Boulder Bed, western Bushveld Complex, South Africa // *Miner. Deposita*, 2003, v. 38, p. 370—380.

Mungall J.E., Brenan J.M. Partitioning of platinum-group elements and Au between sulfide liquid and basalt and the origins of mantle-crust fractionation of the chalcophile elements // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2014, v. 125, p. 265—289.

Park J.-W., Campbell I.H., Eggins S.M. Enrichment of Rh, Ru, Ir and Os in Cr spinels from oxidized magmas: Evidence from the Ambae volcano, Vanuatu // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2012, v. 78 (1), p. 28—50.

Philipp H., Eckhardt J.-D., Puchelt H. Platinum-group elements (PGE) in basalts of the seaward-dipping reflector sequence, SE Greenland Coast // *J. Petrol.*, 2001, v. 42 (2), p. 407—432.

Portnyagin M., Savelyev D., Hoernle K., Hauff F., Garbe-Schönberg D. Mid-Cretaceous Hawaiian tholeiites preserved in Kamchatka // *Geology*, 2008, v. 36, p. 903—906.

Puchelt I.S., Humayun M., 2001. Platinum group element fractionation in a komatiitic basalt lava lake // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2001, v. 65, p. 2979—2993.

Singh T., Manikyamba C. Platinum group element geochemistry and whole-rock systematics of the Vempalle sills, Cuddapah Basin, India: Implications on sulphur saturation history, mantle processes, and tectonic setting // *Geol. J.*, 2020, v. 55 (2), p. 1300—1319, doi: 10.1002/gj.3459.

Sun S.-S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // *Magmatism in the ocean basins*. Geol. Soc. Spec. Publ. № 42, Blackwell Scientific Publications, 1989, p. 313—346.

Tatsumi Y., Oguri K., Shimoda G. The behaviour of platinum-group elements during magmatic differentiation in Hawaiian tholeiites // *Geochem. J.*, 1999, v. 33, p. 237—247.

Woodland S.J., Pearson D.G., Thirlwall M.F. A platinum group element and Re–Os isotope investigation of siderophile element recycling in subduction zones: comparison of Grenada, Laser Antilles Arc, and the Izu–Bonin Arc // *J. Petrol.*, 2002, v. 43 (1), p. 171—198.

Zhang Z., Mao J., Mahoney J.J., Wang F., Qu W. Platinum group elements in the Emeishan large igneous province, SW China: Implications for mantle sources // *Geochem. J.*, 2005, v. 39, p. 371—382.

Zorin Yu.A., Rogozhina V.A. Mechanism of rifting and some features of the deep-seated structure of the Baikal rift zone // *Tectonophysics*, 1978, v. 45 (1), p. 23—30.

Zorin Yu.A., Novoselova M.R., Turutanov E.Kh., Kozhevnikov V.M. Structure of the lithosphere of the Mongolian-Siberian mountainous province // *J. Geodyn.*, 1990, v. 11, p. 327—342.

*Поступила в редакцию 10 октября 2019 г.,
подписана в печать 1 декабря 2020 г.*