

## МИНЕРАЛЫ ПЛАТИНОИДОВ В ДОЛЕРИТАХ О. ЗЕМЛЯ АЛЕКСАНДРЫ (архипелаг Земля Франца-Иосифа)

Е.В. Скляр<sup>1,2</sup>, Ю.В. Карякин<sup>3</sup>, Н.С. Карманов<sup>4</sup>, Н.Д. Толстых<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

<sup>2</sup> Дальневосточный федеральный университет, 690950, Владивосток, ул. Суханова, 8, Россия

<sup>3</sup> Геологический институт РАН, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7, Россия

<sup>4</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

При изучении лавовых потоков о. Земля Александры (арх. Земля Франца-Иосифа) в долеритах верхнего покрова обнаружена благороднометалльная минерализация золото-медно-палладиевого типа. Исследования показали, что выявленные минералы принадлежат двум системам: 1) Cu—Au—Pd, куда относятся купроаурид [Au(Cu, Pd)] и аурикуприд [Au(Cu, Pd)<sub>3</sub>]; 2) Pd—Cu—(Te + Sb + S + As), в которой выявлены соединения, близкие к скаергардиту (PdCu), нилсениту (PdCu<sub>3</sub>) и многочисленным фазам переменного состава — сульфотеллурантимонидам Pd и Cu. Морфология выделения минералов платиноидов (вдоль контактов и по трещинам), низкотемпературные условия их образования, согласно экспериментальным данным, а также присутствие в ассоциации с ними самородной меди, содержащей реликты S, позволяют предположить постмагматическую природу исследованной минерализации. Лавовые потоки о. Земля Александры, сложенные базальтами и долеритами толеитовой серии, предположительно являются продуктами деятельности горячей точки, которая считается источником платиноносных интрузий на востоке Гренландии с минеральными парагенезисами, аналогичными рассмотренным в этой статье.

*Мантйный плюм, крупная изверженная провинция, базальтовый магматизм, золото-медно-палладиевая минерализация, Земля Франца-Иосифа.*

## PLATINUM-GROUP MINERALS IN DOLERITES FROM ALEXANDRA LAND ISLAND (Franz Josef Land Archipelago)

E.V. Sklyarov, Yu.V. Karyakin, N.S. Karmanov, and N.D. Tolstykh

Lavas in Alexandra Land Island of the Franz Josef Land Archipelago bear Au-Cu-Pd-type mineralization. The found mineral species belong to the Cu—Au—Pd and Pd—Cu—(Te + Sb + S + As) systems being, respectively, (i) cuproauride (Au(Cu, Pd)) and auricupride (Au(Cu,Pd)<sub>3</sub>) and (ii) phases similar to skaergaardite (PdCu), nielsenite (PdCu<sub>3</sub>), and numerous S—Te—Sb—Pd—Cu phases of various compositions. The morphology of PGM existing as tiny grains and films along the boundaries of plagioclase and clinopyroxene and in cracks, their crystallization at low temperatures predicted by experimental data, and the presence of native copper with sulfur impurity are signatures of postmagmatic origin. The Alexandra Land tholeiitic basalts and dolerites were, most likely, produced by the hotspot which may be the source of PGE-bearing intrusions in eastern Greenland that contain PGM similar to those discussed in the paper.

*Mantle plume, large igneous province, basaltic magmatism, Cu—PGE—Au mineralization, Franz Josef Land Archipelago*

## ВВЕДЕНИЕ

Крупным изверженным провинциям (LIP — Large igneous provinces) за последние десятилетия посвящено огромное количество публикаций ([Ernst, 2014] и ссылки в ней). Такое внимание обусловлено двумя важнейшими причинами: огромными объемами продуктов разнообразного главным образом базитового магматизма; генетической связью с LIP крупных и сверхкрупных месторождений разной металлогенической направленности [Борисенко и др., 2006; Добрецов и др., 2010, 2013; Добрецов, Похиленко, 2010; Kuzmin et al., 2010; Кузьмин, Ярмолюк, 2014; Pirajno, Santosh, 2014]. Формирование LIP связывается с мантийными плюмами или горячими точками [Koffin, Eldholm, 1994; Ernst, 2014]. К наиболее известным в пределах Российской Арктики относится Сибирский суперплюм, с которым связы-

вают образование пермтриасовой провинции сибирских траппов и Западно-Сибирской рифтовой системы [Добрецов и др., 2013; Кузьмин, Ярмолюк, 2014]. Магматические комплексы Земли Франца-Иосифа (ЗФИ) являются частью крупного Баренцевоморского ареала юрско-мелового базальтоидного магматизма, объем продуктов магматической деятельности которого сопоставим с объемом сибирских траппов, что позволило Е.В. Шипилову с соавторами [Шипилов и др., 2009; Карякин и др., 2010] допустить наличие самостоятельного Баренцевоморско-Амеразийского суперплюма. Еще ранее [Ntaflou, Richer, 2003] эту провинцию было предложено выделять в качестве Арктической LIP. По мнению М.И. Кузьмина с соавторами [Kuzmin et al., 2010; Кузьмин, Ярмолюк, 2014], образование сибирских траппов и других магматических комплексов пермтриасового периода было обусловлено прохождением Северной Сибири над Исландской горячей точкой. Предложенные авторами цитированных публикаций реконструкции положения этой горячей точки предполагают промежуточную позицию Арктической LIP (130—160 млн лет) между сибирскими траппами (~250 млн лет) и современной Исландской горячей точкой, ее координаты в интервале 0—70 млн лет определены достаточно надежно ([Kuzmin et al., 2010; Кузьмин, Ярмолюк, 2014] и ссылки в них). В металлогеническом плане «визитной карточкой» Сибирской и Исландской LIP являются крупные и сверхкрупные месторождения платиноидов (месторождения норильской группы [Добрецов, Похиленко, 2010; Платина..., 2011], массив Скаергаард [Selbekk, Trønnes, 2007] и палеогеновые дайки Гренландии [Holwell et al., 2011]), в то время как в магматических породах Арктической LIP находки платиноидов не отмечались. Присутствие платиновой минерализации в последней могло бы существенно усилить позиции исследователей, связывающих формирование крупных изверженных провинций Арктики с Исландской горячей точкой.

Находки минералов и сплавов платиновой группы (МПП) непосредственно в препаратах чрезвычайно редки, за исключением образцов из руд известных месторождений и рудопоявлений платиноидов [Dill, 2010]. Сведения же о МПП в лавовых потоках, для которых не фиксируется проявление магматической дифференциации, включая и магматические образования ЗФИ, насколько нам известно, полностью отсутствуют. Поэтому нам представляется интересной и важной находка минералов элементов платиновой группы в одном из лавовых потоков о. Земля Александры (ЗФИ), результаты исследований представлены в настоящей статье.

## ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Остров Земля Александры является самым западным в архипелаге ЗФИ и сложен лавовыми покровами долеритов с редкими дайками долеритов и габбро-долеритов северо-западного простирания (рис. 1). Магматические комплексы ЗФИ являются частью крупного Баренцевоморского ареала юрско-мелового базальтоидного магматизма, объем продуктов магматической деятельности которого сопоставим с объемом сибирских траппов [Шипилов и др., 2009; Карякин и др., 2010]. По последним данным [Карякин, Шипилов, 2009; Карякин и др., 2010; Karyakin et al., 2011], здесь выделяются два возрастных интервала магматизма — раннеюрский и позднеюрско-раннемеловой. Базиты второго возрастного интервала слагают верхние покровы, силлы и дайки и относятся к толеитовой серии [Karyakin et al., 2011]. Для них характерны повышенные содержания оксида титана (2.0—3.8 мас. % TiO<sub>2</sub>) и низкие концентрации MgO (3.5—5.0 мас. %). Магматические минералы абсолютно типичны для долеритов: оливин, авгит, плагиоклаз, титаномагнетит, ильменит. В небольших количествах нередко присутствует стекло кислого состава, из акцессорных минералов обычен апатит.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Химические анализы долеритов выполнены в лаборатории химико-аналитических исследований ГИН РАН (г. Москва) и Центре коллективного пользования Иркутского научного центра СО РАН. Составы породообразующих минералов из долеритов и МПП изучены в полированных шлифах на электронном микроскопе LEO 1430VP с энергодисперсионным спектрометром INCAEnergy 350 в ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ). Ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 0.3—0.4 нА, размер пучка < 0.1 мкм, время измерения 50 с. Поскольку размеры зерен МПП не превышают 3 мкм, то оказалось невозможным получить корректные количественные анализы их составов. Для того, чтобы оценить компонентный состав МПП, мы проанализировали 18 наиболее крупных зерен. В дальнейшем из анализов были исключены концентрации элементов, относящихся к вмещающим силикатным минералам (Si, Al, Fe, Mg, Ca, O), а содержания ЭПП и других элементов, не присутствующих в породообразующих минералах, были приведены к 100 %. Такой методический прием, во-первых, дает представление о соотношениях элементов в рудной фазе, а во-вторых, позволяет идентифицировать конкретные минералы при сравнении полученных составов с известными МПП или синтетическими фазами.

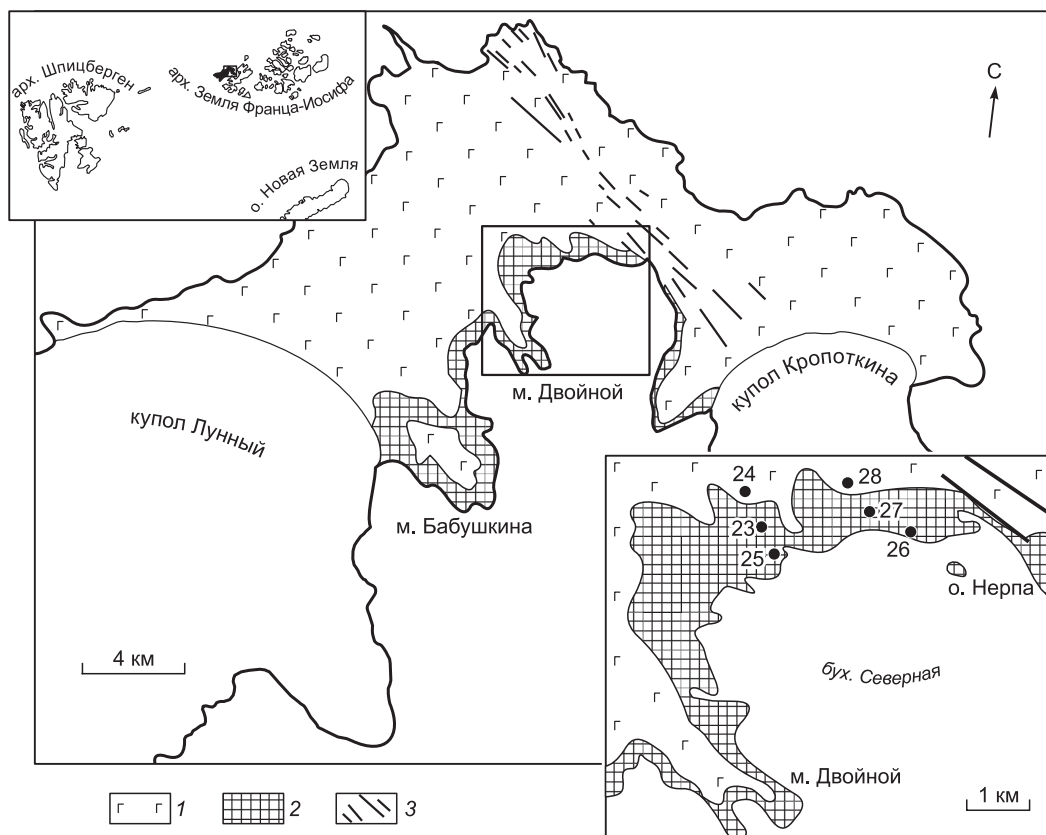


Рис. 1. Схематическая геологическая карта северо-восточной части о. Земля Александры.

1 — базальты раннемелового возраста, 2 — ранне- и позднеюрские базальты нерасчлененные, 3 — зона Нагурского разлома. Черные кружки на врезке — точки опробования.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

**Вещественный состав пород.** На острове были опробованы базальты и долериты по двум разрезам в береговой части бух. Северная зал. Дежнева, где обнажаются три субгоризонтально залегающие покрыва базальтов суммарной мощностью 55—65 м (см. рис. 1). Для каждого из покровов в указанных точках наблюдений (см. рис. 1) отобрано от 6 до 10 проб по разрезу. Нижний лавовый покров с видимой мощностью 7—15 м (обнажения 25, 26) сложен долеритами со столбчатой отдельностью, для которого Ag-Ag методом по плагиоклазу определен возраст около 190 млн лет, что соответствует нижней юре [Карякин, Шипилов, 2009]. Долериты отвечают по химическому составу умеренно титанистым толеитам (табл. 1). Средний покров (обн. 23, 27) сложен базальтами, часто миндалекаменными, и долеритами с глыбовой отдельностью. Базальты верхнеюрского возраста также относятся к толеитовой серии, но отличаются по химическому составу от долеритов нижнего покрова более высокими содержаниями  $TiO_2$  и ряда индикаторных элементов (V, Zr, Ba, U, Hf, REE, см. табл. 1). Верхний покров представлен гигантостолбчатыми долеритами верхнемелового возраста (обн. 24, 28), по своему химическому составу практически не отличающимися от базальтов среднего покрова.

Минералы платиноидов были обнаружены в долеритах верхнего покрова. Основными минералами долеритов являются плагиоклазы и клинопироксены. Плагиоклазы характеризуются хорошо выраженной зональностью с центральными частями зерен, сложенными лабрадором и каймой андезинового состава (табл. 2). Пироксены обычно представлены гломеропорфировыми сростками авгита и пижонита (рис. 2, а), причем последний характеризуется резко выраженной зональностью (см. табл. 2). Титаномагнетит образует крупные таблитчатые выделения, в которых нередко присутствуют вроски ильменита. В небольшом количестве в интерстициях между породообразующими минералами наблюдается стекло кислого состава (см. рис. 2, б), насыщенное мелкими выделениями ильменита и игльчатými кристаллами апатита. Представительные составы всей минеральной ассоциации приведены в табл. 2. Степень вторичных преобразований пород слабая, суммарное количество вторичных минералов (палагонит, боулингит) не превышает 5 %.

Таблица 1.

## Представительные анализы долеритов о. Земля Александры

Компонент	Нижний покров		Средний покров		Верхний покров			
	189.9 ± 3.1*		156.5 ± 5.3		135 ± 4		131.2 ± 5.9	
	25-3	25-6	23-1	23-6	24-2	24-5	28-5	28-9
SiO <sub>2</sub> , мас. %	47.57	47.13	48.43	47.29	46.30	46.60	46.93	45.95
TiO <sub>2</sub>	1.54	1.53	2.11	2.21	1.98	2.16	2.11	2.04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.40	15.10	13.50	15.00	13.50	14.50	14.00	13.50
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.62	6.85	7.10	4.53	7.03	6.81	6.37	5.12
FeO	5.20	5.08	6.30	8.80	7.54	7.11	6.95	9.16
MnO	0.18	0.19	0.18	0.22	0.20	0.21	0.18	0.21
MgO	5.71	6.02	5.66	5.26	6.00	4.90	4.45	4.67
CaO	11.90	12.10	10.50	11.60	10.80	11.40	11.10	11.60
Na <sub>2</sub> O	3.07	2.80	3.07	2.92	2.87	2.78	2.67	2.64
K <sub>2</sub> O	0.24	0.22	0.19	0.27	0.30	0.22	0.24	0.20
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.11	0.13	0.26	0.28	0.23	0.32	0.26	0.25
П.п.п.	2.12	2.38	3.07	1.53	3.21	2.29	4.20	3.80
Сумма	99.66	99.53	100.37	99.91	99.96	99.30	99.46	99.14
Sc, г/т	35	35	40	36	40	38	40	43
V	277	274	362	332	340	347	369	345
Cr	148	144	104	91	95	86	110	124
Ni	87	90	87	73	67	66	64	86
Co	42	43	40	47	48	43	38	49
Rb	5.9	4.8	1.8	5.6	12.0	1.5	1.8	1.8
Sr	180	185	189	196	177	192	194	181
Y	26	26	32	37	36	35	29	33
Zr	102	99	142	152	156	147	131	135
Nb	6.8	5.8	9.0	10	9.4	9.4	7.9	8.2
Ba	88	85	117	125	137	126	118	133
Th	1.51	1.47	1.48	1.81	1.44	1.80	1.47	1.32
U	0.11	0.19	0.39	0.22	0.37	0.21	0.39	0.36
Hf	3.28	3.22	4.63	5.59	4.57	5.21	4.57	4.33
Ta	0.57	0.56	0.45	0.96	0.85	1.02	0.72	0.79
La	8.22	8.26	11.20	12.79	10.89	12.69	10.00	10.28
Ce	20.93	20.72	28.43	33.07	28.61	32.32	26.12	25.95
Pr	3.08	2.96	4.04	4.81	4.18	4.71	3.80	3.83
Nd	14.27	13.88	19.69	22.98	19.56	23.17	17.80	17.92
Sm	4.14	4.00	5.82	6.85	5.63	6.45	5.43	5.40
Eu	1.41	1.37	1.90	2.24	1.89	2.14	1.87	1.78
Gd	4.68	4.56	6.67	7.78	6.62	7.26	6.09	6.07
Tb	0.83	0.81	1.14	1.38	1.14	1.27	1.06	1.08
Dy	5.28	5.10	7.22	8.59	7.21	8.09	6.46	6.82
Ho	1.11	1.07	1.49	1.77	1.53	1.67	1.34	1.41
Er	3.14	3.12	4.10	4.67	4.22	4.48	3.62	3.84
Tm	0.46	0.45	0.60	0.66	0.61	0.64	0.53	0.57
Yb	2.76	2.74	3.61	4.18	3.70	4.04	3.19	3.51
Lu	0.46	0.46	0.61	0.74	0.64	0.72	0.54	0.61

\* Возраст (млн лет).

**Минералы платиноидов и самородная медь.** МПГ были зафиксированы в полированном шлифе (2 × 2 см) в ассоциации с многочисленными зернами самородной меди размером от 2 до 7 мкм (см. рис. 2, а, б), рассеянными по всему шлифу. Самородная медь присутствует и в других отобранных образцах покрова. Во всех случаях выделения меди фиксируются либо в продуктах вторичного изменения темноцветных минералов (палагоните) (см. рис. 2, а), либо в кислом стекле (см. рис. 2, б). В составе

Таблица 2. Представительные составы минералов из долерита с платиновой минерализацией и стекла из долерита с вкрапленностью самородной меди

Компонент	Pgt c	Pgt r	Aug	Pl c	Pl r	Ilm	Ti-Mag	Gl
SiO <sub>2</sub> , мас. %	51.33	49.00	51.01	52.29	58.59	нпо	нпо	78.50
TiO <sub>2</sub>	0.49	0.73	0.97	нпо	нпо	48.40	24.36	0.67
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.71	0.75	2.08	29.53	24.33	нпо	1.98	10.98
FeO <sub>tot</sub>	25.19	31.02	10.63	1.00	1.07	48.16	52.29	2.15
MnO	0.49	0.80	нпо	нпо	нпо	0.56	0.47	нпо
MgO	16.65	9.66	14.80	»	»	1.21	0.74	»
CaO	5.11	8.02	19.44	12.50	6.74	нпо	нпо	1.17
Na <sub>2</sub> O	нпо	нпо	нпо	4.19	7.11	»	»	4.74
K <sub>2</sub> O	»	»	»	0.21	0.49	»	»	1.25
Сумма	99.97	99.98	98.93	99.72	98.33	98.33	79.84	99.47
О	6			8		3	4	—
Si, ф.ед.	1.968	1.959	1.926	2.387	2.670	0.000	0.000	—
Ti	0.014	0.022	0.028	0.000	0.000	0.922	0.681	—
Al	0.032	0.035	0.093	1.589	1.307	0.000	0.087	—
Fe <sup>3+</sup>	0.003	0.002	0.001	—	—	0.156	0.551	—
Fe <sup>2+</sup>	0.805	1.035	0.334	0.038	0.041	0.864	1.625	—
Mn	0.016	0.027	0.000	0.000	0.000	0.012	0.015	—
Mg	0.952	0.576	0.833	0.000	0.000	0.046	0.041	—
Ca	0.210	0.344	0.786	0.611	0.329	0.000	0.000	—
Na	0.000	0.000	0.000	0.371	0.628	0.000	0.000	—
K	0.000	0.000	0.000	0.012	0.028	0.000	0.000	—
Сумма	4.000	4.000	4.000	5.010	5.004	2.000	3.000	—

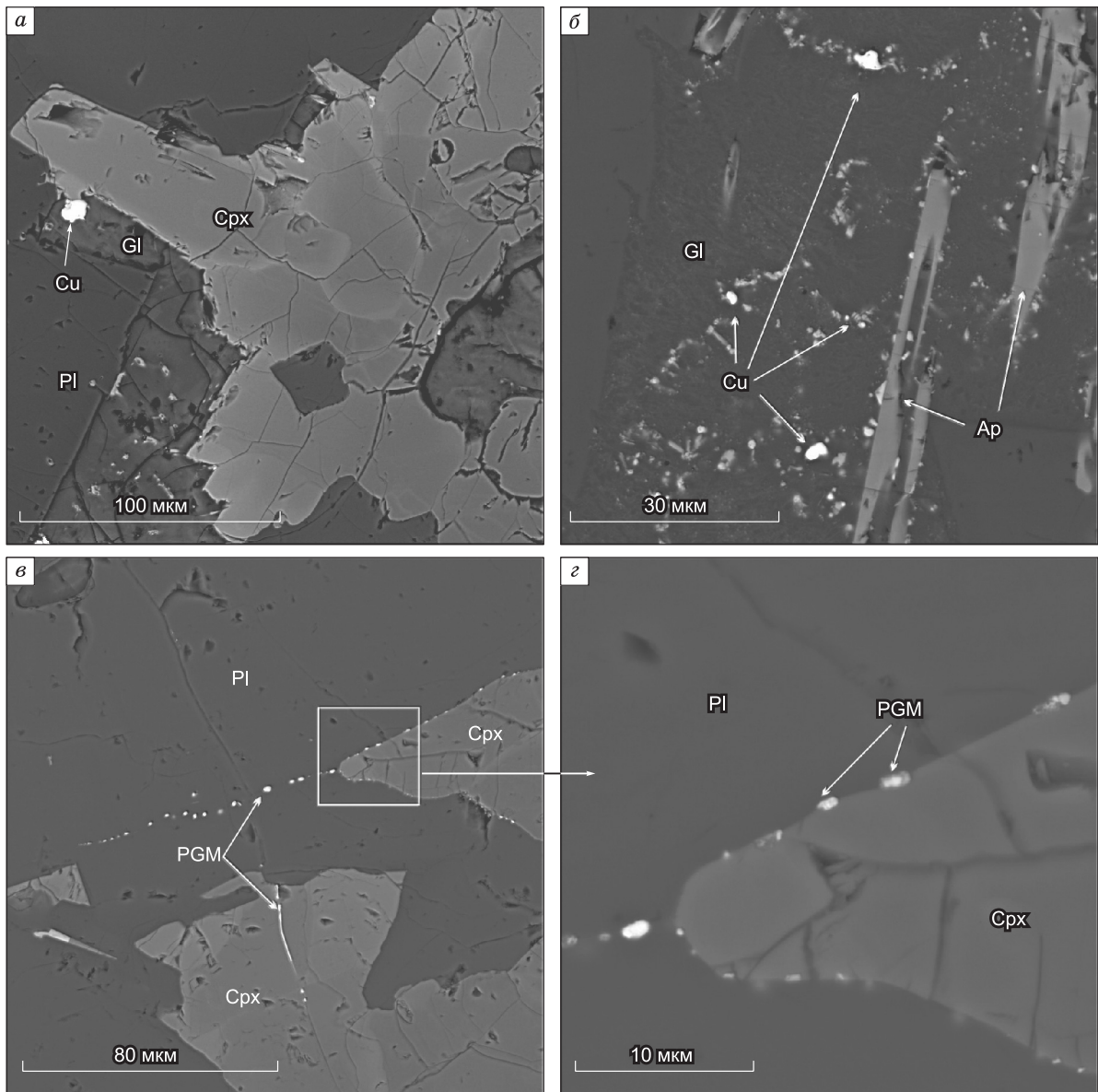
Примечание. Обозначения минералов, по [Whitney, Evans, 2010]. Gl — стекло, с — центр зерна, r — кайма, нпо — ниже пределов обнаружения.

наиболее крупных зерен меди отмечается примесь серы (до 0.5 %, ан. 19—21, табл. 3). Нами не выявлены непосредственные сростания самородной меди и МПГ. Минералы платиноидов, в отличие от самородной меди, группируются в цепочки на контакте между клинопироксеном и плагиоклазом, а также по трещинам в обоих породообразующих минералах (см. рис. 2, в). Размеры зерен МПГ составляют от 0.2 до 3.0 мкм.

Полученные и пересчитанные содержания элементов приведены в табл. 3. По соотношению слагающих элементов было выделено шесть групп: Cu-Au-Pd, Pd-Cu, Pd-Cu-Sb, Pd-Cu-Te, Pd-Cu-S и Cu (самородная медь). В большинстве зерен суммарная доля Cu и Pd составляет 70—90 %. Пересчет их на атомные проценты показал, что эти группы соединений образуют два основных кластера. Первый относится к системе Cu—Au—Pd. Три состава этой системы рассчитываются на целочисленные коэффициенты (рис. 3). Наиболее богатое золотом соединение рассчитывается на формулу Au<sub>2</sub>PdCu. В зависимости от того, какой элемент замещается палладием в структуре (Au или Cu), оно может соответствовать двум упорядоченным синтетическим фазам: Au<sub>3</sub>Cu или AuCu. Второе соединение в этой системе (Au, Pd) Cu, скорее всего, относится к Pd-содержащему купроауриду (AuCu<sub>куб.</sub>) или тетрааурикуприду (AuCu<sub>тетр.</sub>), в котором золото частично замещается палладием. Третье соединение рассчитывается на формулу Au(Cu, Pd)<sub>3</sub> и соответствует Pd-содержащему аурикуприду AuCu<sub>3</sub>. Выявленные нами соединения системы Cu—Pd—Au практически не имеют других примесей за исключением Ag в одном из составов.

Следующий кластер соединений относится к системе Pd—Cu—(Te + Sb + S + As). Твердые растворы Pd-Cu, в которых халькогенные элементы находятся в виде незначительной примеси, на диаграмме расположены в интервале упорядоченной кубической структуры (25—50 ат. % Pd) или между двумя минералами: скаергардитом (PdCu) и нилсенитом (Cu<sub>3</sub>Pd) (рис. 4). Но большая часть обнаруженных нами соединений содержит значительное количество Sb, Te, S и As, в переменных количествах и разных соотношениях между собой (см. табл. 3). Для этих составов не наблюдается каких-либо значимых за-





**Рис. 2. Минералы платиноидов и самородная медь в долеритах (изображения в обратнорассеянных электронах).**

*а* — выделение самородной меди в палагоните (Pl); *б* — выделения самородной меди в кислом стекле, стекло насыщено мелкими выделениями ильменита и игольчатыми кристаллами апатита; *в*, *г* — выделения минералов платиноидов на границе клинопироксена и плагиоклаза, а также по трещинам в плагиоклазе и пироксене. Обозначения минералов, по [Whitney, Evans, 2010]. Gl — стекло кислого состава.

кономерностей (см. рис. 4), но можно отметить, что часть из них приближается к линии составов  $(Pd, Cu)_3(Sb, Te, As, S)$ , на которой также расположены ранее выявленные незазванные фазы [Stumpfl, 1961; Подлипский и др., 2015].

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В относительно маломощном лавовом потоке отсутствуют признаки кристаллизационной дифференциации, характерной для платиноносных массивов, что подтверждается очень незначительными вариациями составов по его разрезу. Поэтому здесь трудно ожидать обнаружение сколько-нибудь экономически важных рудных объектов. Однако в рассматриваемом регионе кроме лавовых потоков и даек отмечаются также и силлы [Карякин, Шипилов, 2009], их специализированное изучение, учитывая пла-

Таблица 3. Состав минералов платиноидов и самородной меди (мас. %) из долеритов о. Земля Александры

№ п/п	Группа	Cu	Au	Ag	Pt	Pd	Rh	Sb	Te	As	Se	S	Сумма	Сумма*
1	Cu-Au-Pd	<b>41.36</b>	<b>46.05</b>	0.00	нпо	<b>12.59</b>	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	100.00	77.99
2		<b>26.80</b>	<b>57.40</b>	2.80	»	<b>13.00</b>	»	»	»	»	»	»	100.00	32.59
3		<b>11.61</b>	<b>71.57</b>	нпо	»	<b>16.82</b>	»	»	»	»	»	»	100.00	23.29
4	Pd-Cu	<b>58.86</b>	6.51	»	3.20	<b>30.63</b>	»	»	»	»	»	0.80	100.00	47.56
5		<b>57.00</b>	нпо	»	нпо	<b>35.20</b>	»	3.20	4.60	»	»	0.00	100.00	40.82
6		<b>44.20</b>	4.30	»	2.80	<b>43.30</b>	»	нпо	4.10	»	»	1.30	100.00	88.72
7		<b>42.20</b>	4.40	»	2.90	<b>45.50</b>	»	»	4.00	1.00	»	0.00	100.00	90.49
8		<b>41.24</b>	2.90	»	1.30	<b>40.94</b>	1.40	»	7.81	1.00	»	3.40	100.00	82.92
9		<b>39.24</b>	2.00	»	1.20	<b>48.55</b>	»	»	6.01	0.90	»	2.10	100.00	70.96
10		<b>35.04</b>	3.10	»	1.40	<b>56.06</b>	»	»	3.10	1.30	»	0.00	100.00	72.14
11	Pd-Cu-Sb	<b>45.05</b>	5.39	»	4.10	<b>27.47</b>	»	<b>12.79</b>	нпо	3.80	»	1.40	100.00	56.91
12		<b>24.00</b>	1.90	»	1.40	<b>44.50</b>	»	<b>25.20</b>	»	нпо	»	3.00	100.00	70.04
13		<b>31.90</b>	4.50	»	8.60	<b>28.40</b>	»	<b>14.30</b>	»	10.10	»	2.20	100.00	63.28
14	Pd-Cu-Te	<b>35.60</b>	0.00	»	нпо	<b>46.90</b>	»	нпо	<b>17.50</b>	нпо	»	0.00	100.00	35.53
15		<b>38.06</b>	2.30	»	»	<b>28.67</b>	»	»	<b>27.37</b>	»	»	3.60	100.00	34.58
16		<b>40.40</b>	0.00	»	»	<b>35.30</b>	»	»	<b>23.30</b>	»	»	1.00	100.00	32.92
17	Pd-Cu-S	<b>59.44</b>	6.79	»	»	<b>19.48</b>	2.10	5.49	0.00	»	»	<b>6.69</b>	100.00	31.17
18		<b>60.14</b>	2.00	»	»	<b>22.68</b>	нпо	нпо	2.30	»	3.10	<b>9.79</b>	100.00	49.50
19	Cu	<b>99.58</b>	0.00	»	»	нпо	»	»	нпо	»	нпо	0.42	100.00	98.31
20		<b>99.59</b>	0.00	»	»	»	»	»	»	»	»	0.41	100.00	99.51
21		<b>99.63</b>	0.00	»	»	»	»	»	»	»	»	0.37	100.00	99.57

Примечание. Анализы в таблице приведены к 100 мас. % после вычета из первоначальной суммы концентраций Si, Al, Fe, Mg, Ca и O. Жирным шрифтом отмечены принципиальные компоненты, по которым выделены группы зерен. нпо — ниже порога обнаружения.

\* Остаток после вычета.

тиноносность исследованных долеритов, может иметь смысл, поскольку малые интрузии (дайки, силлы), содержащие ЭПГ, генетически связаны с магматическими камерами на глубине [Holwell et al., 2011], фракционирование расплава в которых может приводить к потенциально значимым рудопроявлениям.

Для долеритов ЗФИ по геохимическим и изотопным данным обоснована плюмовая природа [Ntafos, Richer, 2003], как и для сибирских траппов. По данным М.И. Кузьмина с соавторами [Kuzmin et al., 2010], образование последних связано с мантийным плюмом, который в настоящее время находится под

Исландией. На возрастном отрезке в 55 млн лет результатом деятельности этого плюма явились расслоенная интрузия Скаергаард в Гренландии [Selbekk, Trønnes, 2007], расслоенные интрузивы на островах Скай и Рам в Шотландии. В верхней части расслоенной серии Скаергаардского интрузива обнаружена необычная мало-сульфидная золото-палладиевая ассоциация с аналогичными парагенезисами выявленных нами минералов Pd—Cu и Au—Pd—Cu систем [Rudashevsky et al., 2004]. В соответствии с реконструкциями [Kuzmin et al., 2010] во времен-

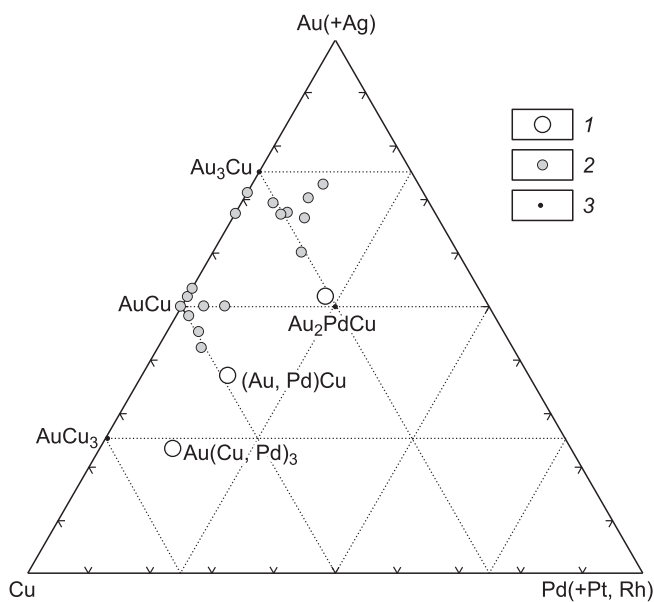


Рис. 3. Составы минералов платиноидов из долеритов верхнего покрова о. Земля Александры в системе Au—Pd—Cu.

1 — о. Земля Александры, 2 — Кондерский массив [Некрасов и др., 1994]; 3 — идеальные составы известных Au—Pd—Cu фаз.

**Рис. 4. Составы минералов платиноидов из долеритов верхнего покрова о. Земля Александры в системе Pd—Cu—(Te, Sb, S, As, S).**

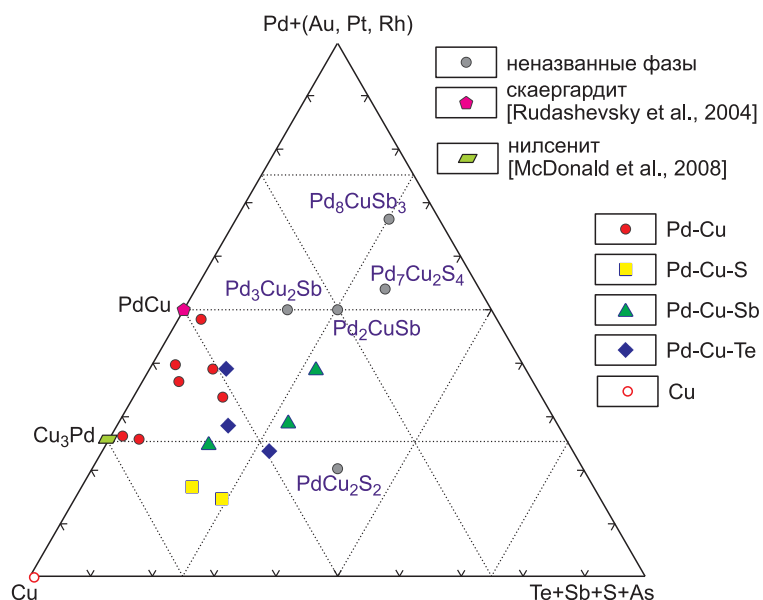
Неизвестные фазы из работ [Stumpfl, 1961; Cabri et al., 1996; Подлипский и др., 2015].

ном отрезке 130—150 млн лет, этот плюм находился как раз в районе ЗФИ, который также мог взять на себя ответственность за формирование лавовых потоков толеитовых базальтов, вмещающих благороднометалльную минерализацию с золото-палладиевой специализацией. Как и на Скаергаарде, МПГ в базальтах о. Земля Александры ассоциируют с ильменитом и апатитом.

Данные исследований показывают отчетливую Cu-Pd специфику минералов платиноидов из долеритов о. Земля Александры. Морфология выделения зерен свидетельствует о том, что образование рудных фаз происходило на поздней стадии рудообразующего процесса либо из флюидонасыщенного расплава, либо из гидротермального раствора с последующим просачиванием по границам и трещинам закристаллизовавшихся минералов.

Выявленные нами Au-Pd-Cu соединения присутствуют на Кондерском платиноносном массиве в серпентинитах по дунитам [Некрасов и др., 1994], причем они также соответствуют формулам (Au, Pd)Cu и (Au, Pd)<sub>3</sub>Cu, но с меньшей концентрацией палладия (см. рис. 3). Действительно, они являются относительно низкотемпературными продуктами минеральных ассоциаций, поскольку, согласно экспериментальным данным, упорядочение твердых растворов в системе Au—Cu происходит при 480 °C для AuCu и при 200 °C для Au<sub>3</sub>Cu [Благородные металлы..., 1984]. Эти температуры соответствуют как пневматолитовой стадии, на которой из флюидонасыщенных остаточных сульфидных расплавов может образовываться Pd-минерализация, так и гидротермальной стадии, когда МПГ откладываются непосредственно из растворов или образуются путем воздействия их на первичные минералы. Например, в толеитовых габбро Скаергаарда [Rudashevsky et al., 2004] нилсенит (PdCu<sub>3</sub>) описан как продукт кристаллизации непосредственно из сульфидного расплава при температуре ниже 508 °C [McDonald et al., 2008]. С другой стороны, нахождение Au-Pd-Cu соединений в серпентинитах Кондерского массива предполагает их образование за счет серпентинизирующих растворов [Некрасов и др., 1994].

Как показано выше, расчеты составов системы Pd—Cu—(Te + Sb + S + As) проявляют широкие вариации анионной части выявленных соединений. Магматические температуры при формировании соединений в этой системе не предполагают образование такого широкого поля твердых растворов. Как правило, в этой системе из сульфидного расплава образуются устойчивые фазы и изоморфные ряды их составов [Makovicky, 2002]. Следовательно, это позволяет отнести выявленные нами соединения платиноидов к вторичным продуктам, в разной степени заместившим первичные минералы Pd, возможно, такие как куперит, стибиопалладинит, меренскиит и др., за счет обогащенных медью флюидов или гидротермальных растворов. Такой сценарий ранее описан в работах, где первичные минералы последовательно замещаются Cu-содержащими соединениями: стибиопалладинит (Pd<sub>5</sub>Sb<sub>2</sub>) — Pd-Cu-Sb фазами (в Cu-Ni рудах из Тартайского массива южного обрамления Сибирского кратона) [Мехоношин и др., 2013; Подлипский и др., 2015], а палладоарсенид (Pd<sub>2</sub>As) — нилсенитом (PdCu<sub>3</sub>) в Дзелятышорском верлит-клинопироксенитовом массиве на Полярном Урале [Пыстин и др., 2010]. Более того, авторы работы [Holwell et al., 2011] при исследовании МПГ минерализации из габброидных даек в Восточной Гренландии, которые также считаются продуктами жизнедеятельности Исландского плюма, на основе геохимических особенностей рудных элементов предположили активное воздействие низкотемпературных флюидов, выносящих Cu из первичной сульфидной минерализации. Аналогичная ситуация была описана для интрузии Ривер Вали (River Valley) [Price et al., 2010]. Вторичное происхождение обнаруженных нами фаз подтверждается также присутствием в описанной ассоциации самородной меди со следами серы, которая также, вероятно, образовалась в результате воздействия реакционных растворов на предшествующие сульфиды.





## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Лавовые потоки о. Земля Александры, сложенные базальтами толеитовой серии, содержат рассеянную благороднометалльную минерализацию золото-медно-палладиевого типа. Для базальтов характерно также присутствие самородной меди с небольшой примесью серы.

2. Исследования показали, что выявленные минералы принадлежат двум системам: 1) Cu—Au—Pd, куда относятся купроаурид [Au(Cu, Pd)] и аурикуприд [Au(Cu, Pd)]; 2) Pd—Cu—(Te + Sb + S + As), в которой выявлены соединения, близкие к скаергардиту (PdCu), нилсениту (PdCu<sub>3</sub>) и многочисленным фазам переменного состава — сульфотеллурантимонидам Pd и Cu.

3. Морфология выделения минералов платиноидов, низкотемпературные условия их образования, а также присутствие самородной меди, содержащей реликты S при отсутствии сульфидов в парагенезисах, позволяют предположить вторичную природу исследованной минерализации.

4. Данные по сибирским траппам, базитам Гренландии и Земли Франца-Иосифа указывают на связь Cu-Pt-Pd оруденения с магматическими комплексами плюмовой природы. Важная задача дальнейших исследований — решить с какими типами плюмового магматизма (разбивающими суперконтиненты или с горячими точками типа Исландской) формируются различные по масштабам проявления Cu-Pt-Pd оруденения.

Авторы выражают свою искреннюю признательность рецензентам А.Э. Изоху и А.С. Мехоношину за конструктивные замечания и предложения.

Исследования выполнены при частичной поддержке Арктической программы фундаментальных исследований Президиума РАН, ОНЗ-2 РАН и РФФИ (грант 14-05-00143).

## ЛИТЕРАТУРА

**Благородные металлы.** Справочник / Ред. Е.М. Савицкий. М., Металлургия, 1984, 592 с.

**Борисенко А.С., Сотников В.И., Изох А.Э., Поляков Г.В., Оболенский А.А.** Пермотриасовое оруденение Азии и его связь с проявлением плюмового магматизма // Геология и геофизика, 2006, т. 47 (1), с. 166—182.

**Добрецов Н.Л., Похиленко Н.П.** Минеральные ресурсы Российской Арктики и проблемы их освоения в современных условиях // Геология и геофизика, 2010, т. 51 (1), с. 126—141.

**Добрецов Н.Л., Борисенко А.С., Изох А.Э., Жмодик С.М.** Термохимическая модель пермотриасовых мантийных плюмов Евразии как основа для выявления закономерностей формирования и прогноза медно-никелевых, благородно- и редкометалльных месторождений // Геология и геофизика, 2010, т. 51 (9), с. 1159—1187.

**Добрецов Н.Л., Верниковский В.А., Карякин Ю.В., Кораго Е.А., Симонов В.А.** Мезозойско-кайнозойский вулканизм и этапы геодинамической эволюции Центральной и Восточной Арктики // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (8), с. 1126—1144.

**Карякин Ю.В., Шпилов Э.В.** Геохимическая специализация и <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar возраст базальтоидного магматизма островов Земля Александры, Нортбрук, Гукера и Хейса (архипелаг Земля Франца-Иосифа) // ДАН, 2009, т. 425, № 2, с. 1—5.

**Карякин Ю.В., Складаров Е.В., Травин А.В., Шпилов Э.В.** Возраст и состав базальтов центральной и юго-западной частей архипелага Земли Франца-Иосифа // Тектоника и геодинамика складчатых поясов и платформ фанерозоя. Т. 1. М., Геос, 2010, с. 293—301.

**Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В.** Мантийные плюмы Северо-Восточной Азии и их роль в формировании эндогенных месторождений // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (2), с. 153—184.

**Мехоношин А.С., Толстых Н.Д., Подлипский М.Ю., Колотилина Т.Б., Вишневский А.В., Бенедюк Ю.П.** Платинометалльная минерализация дунит-верлитовых массивов Гутаро-Удинского между-речья (Восточный Саян) // Геология рудных месторождений, 2013, т. 55, № 3, с. 189—202.

**Некрасов И.Я., Ленников А.М., Октябрьский Р.А., Залищак Б.Л., Сапин В.И.** Петрология и платиноносность кольцевых щелочно-ультраосновных комплексов. М., Наука, 1994, 381 с.

**Платина России** / Отв. ред. Д.А. Додин. Красноярск, Изд-во «Знак», 2011, 563 с.

**Подлипский М.Ю., Мехоношин А.С., Толстых Н.Д., Вишневский А.В., Поляков Г.В.** Минералого-геохимические особенности Тартайского массива, Восточно-Сибирская металлогеническая провинция // Геология рудных месторождений, 2015, т. 57, № 3, с. 172—196.

**Пыстин А.М., Пыстина Ю.И., Генералов В.И., Потанов И.Л.** Новый тип золото-платинометалльного оруденения на Полярном Урале // Изв. Коми НЦ УрО РАН, 2010, т. 3, № 2, с. 48—53.

**Шпилов Э.В., Карякин Ю.В., Матишов Г.Г.** Баренцево-Амеразийский юрско-меловой суперплюм и инициальный этап геодинамической эволюции Арктического океана // ДАН, 2009, т. 426, № 3, с. 369—372.

- Cabri L.J., Harris D.C., Weiser T.W.** Mineralogy and distribution of platinum mineral (PGE) placer deposits of the world // *Explor. Mining. Geol.*, 1996, v. 5, p. 73—167.
- Dill H.G.** The «chessboard» classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium // *Earth Sci. Rev.*, 2010, v. 100, № 1, p. 1—420.
- Ernst R.E.** Large igneous provinces. Cambridge, Cambridge University Press, 2014, 653 p.
- Holwell D.A., Abraham-James T., Keays R.R., Boyce A.J.** The nature and genesis of marginal Cu-PGE-Au sulphide mineralization in Paleogene macrodykes of the Kangerlussuaq region, East Greenland // *Miner. Depos.*, 2011, doi: 10.1007/s00126-010-0325-4.
- Karyakin Yu.V., Shipilov E.V., Simonov V.A., Sklyarov E.V., Travin A.V.** Phases and stages of the plume magmatism in the Franz Jozef Land Archipelago // Large Igneous Provinces of Asia (Abstrs. Intern. Symp.) 2011, Irkutsk, Inst. Earth Crust SB RAS, p. 96—98.
- Koffin M.F., Eldholm O.** Large igneous provinces: crustal structure, dimensions, and external consequences // *Rev. Geophys.*, 1994, v. 32, № 1, p. 1—36.
- Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., Kravchinsky V.A.** Phanerozoic hot spot traces and paleogeographic reconstructions of the Siberian continent based on interaction with the African large low shear velocity province // *Earth Sci. Rev.*, 2010, v. 102, № 1, p. 29—59.
- Makovicky E.** Ternary and Quaternary phase systems with PGE // The geology, geochemistry, mineralogy and mineral beneficiation of platinum-group elements / Ed. L.J. Cabri. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2002, spec. vol. 54, p. 131—175.
- McDonald A.M., Cabri L.J., Rudashevsky N.S., Stanley C.J., Rudashevsky V.N., Ross K.C.** Nielsenite, PdCu<sub>3</sub>, a new platinum-group intermetallic mineral species from the Skaergaard intrusion, Greenland // *Can. Miner.*, 2008, v. 46, p. 709—716.
- Ntafos T., Richer W.** Geochemical constraints on the origin of the continental flood basalt magmatism in Franz Josef Land, Arctic Russia // *Eur. J. Miner.*, 2003, v. 15, p. 649—663.
- Pirajno F., Santosh M.** Rifting, intraplate magmatism, mineral systems and mantle dynamics in central-east Eurasia: An overview // *Ore Geol. Rev.*, 2014, v. 63, № 2, p. 265—295.
- Price M.M., Samson I.M., Fryer B.J., Barrie C.T.** Platinum group element mineralization in the River Valley intrusion, Ontario, Canada: characterization and effects of water-rock interaction // Ext. Abstracts, 11th international platinum symposium / Ed. P. Jugo. Sudbury, Canada, Ontario Geological Survey, Miscellaneous Release-Data 269, 2010.
- Rudashevsky N.S., McDonald A.M., Cabri L.J., Nielsen T.F.D., Stanley C.J., Kretzer Yu.L.** Skaergaardite, PdCu, a new platinum-group intermetallic mineral from the Skaergaard intrusion, Greenland // *Miner. Mag.*, 2004, v. 68, № 4, p. 615—632.
- Selbekk R.S., Trønnes R.G.** The 1362 AD plinian Öräfajökull eruption, Iceland: petrology and geochemistry of large-volume homogeneous rhyolite // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2007, v. 160, p. 42—58.
- Stumpfl E.F.** Some new platinoid-rich minerals, identified with the electron microanalyser // *Miner. Mag.*, 1961, v. 32, p. 833—847.
- Whitney D.L., Evans B.W.** Abbreviations for names of rock-forming minerals // *Amer. Miner.*, 2010, v. 95, p. 185—187.

*Поступила в редакцию  
8 июля 2015 г.*