

**Рудоносные анортозиты Рифа I верхнерифейского Йоко-Довыренского массива:
новые данные по составу, ЭПГ-Cu-Ni минерализации, флюидному режиму
и условиям образования**

© Д. А. Орсов

Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия. E-mail: magma@ginst.ru

Излагаются результаты изучения рудоносных анортозитов Рифа I Йоко-Довыренского массива. Показано, что сульфидные ассоциации и минерализация ЭПГ связаны с эволюцией несмешивающейся сульфидной жидкости, обогащенной летучими компонентами. Большинство минералов ЭПГ относятся к послемагматической пневматолито-гидротермальной стадии. Кристаллизация сосуществующего высокоглиноземистого силикатного расплава описывается в экспериментальной системе An-Di-Fo.

Ключевые слова: анортозиты; сульфидная жидкость; силикатный расплав; породообразующие минералы; элементы платиновой группы; флюидный режим и летучие компоненты.

**Ore-bearing anorthosites of the Reef I of the Upper Riphean Yoko-Dovyren Massif:
new data on the composition, PGE-Cu-Ni mineralization, fluid regime and formation conditions**

D. A. Orsoev

Geological Institute, SB RAS, Ulan-Ude, Russia. E-mail: magma@ginst.ru

The results of the study of ore-bearing anorthosites of the Reef I of the Yoko-Dovyren Massif are represented. It is demonstrated that the sulfide associations and the PGE mineralization are associated with the evolution of an immiscible sulfide liquid enriched in volatile components. Most PGE minerals refer to the postmagmatic pneumatolytic-hydrothermal stage. The crystallization of a coexisting high-alumina silicate melt is described in the experimental system An-Di-Fo.

Keywords: anorthosites; sulfide liquid; silicate melt; rock-forming minerals; platinum group elements; fluid regime and volatile components.

Платиноносный Риф I с малосульфидным типом оруденения располагается в верхней части «критической зоны» Йоко-Довыренского массива. Ранее проведенными нами исследованиями было установлено пространственное положение и строение этой зоны, показано, что в пределах Рифа I основными концентраторами элементов платиновой группы (ЭПГ) являются анортозитовые обособления и лейкократовые оливиновые габбро с крайне неоднородной (такситовой) текстурой, выявлены 14 минералов ЭПГ и 6 — Au и Ag, а также показана роль процессов дифференциации и флюидного режима в переносе и концентрировании ЭПГ. Все эти данные были нами обобщены в монографии [1]. Однако, за прошедшие годы накоплен новый фактический материал, который позволил для анортозитов дополнить данные по их химическому и минеральному составу, выявить новые платиновые минералы и их взаимоотношения с сульфидными ассоциациями, изучить с помощью метода газовой хроматографии водный и газовый состав флюидной фазы. В настоящем сообщении все эти новые данные предлагаются вашему вниманию. Исследования базируются на изучении 24 образцов и проб анортозитов и такситовых оливиновых лейкогаббро, отобранных при составлении разрезов «критической зоны» и Рифа I.

Рудоносные анортозиты представлены жилообразными телами, но чаще шпирями и гнездами неправильной формы, размер их варьирует от десятков сантиметров до 1 м, редко более. На контактах отсутствуют признаки закалки и деформации вмещающих пород. Характерны неравномерное зернистое строение, неоднородная (такситовая) текстура, выраженная участками сгущения (обычно в виде полос) темноцветных минералов (оливин, пироксены, хромшпинелиды и др.). К ним, как правило, приурочена мелкая вкрапленность сульфидов в количестве до 5 об.%. В плагиоклазовой матрице сульфидов существенно меньше. Основной объем породы (до 94%) слагают призматические кристаллы бедного Ca битовнита, состав которого изменяется в пределах $An_{76.5-87.5}Ab_{12.0-23.5}Or_{0.4-0.7}$, постоянно фиксируется изоморфная примесь FeO (0.42–0.61 мас. %). Второстепенные минералы: оливин ($For_{81.2-78.3}$), содержащий NiO (0.19–0.34 %), авгит ($En 39.5-44.3$, $Fs 9.5-18.0$, $Wo 41.1-47.0$), энстатит ($En 73.5-79.2$, $Fs 16.2-23.7$, $Wo 2.5-4.6$), магнезиальная роговая обманка ($f = 15.6-49.4$ %). Акцессорные хромшпинелиды (малотитанистые ферриалюмохромит, субалюмоферрихромит и субалюмохроммагнетит по классификации Н.В. Павлова) ассоциируют с кумулятивным оливином и плагиоклазом, Вторичные минералы — тремолит-актинолит, хлорит, минералы группы эпидота, биотит

($f = 47.7\text{--}53.0\%$). Обнаружены единичные зерна ортоклаза, хлорапатита, циркона, бадделеита, ловелингита, уран- и торий содержащих фаз.

Химический состав анортозитов охватывает интервал по SiO_2 (мас.%) 44.20–48.69, Al_2O_3 21.12–35.00, CaO 11.75–16.82, FeO^* 1.66–6.93 и MgO 0.34–13.15. Породы характеризуются низкими содержаниями TiO_2 (0.03–0.22) и P_2O_5 (0.01–0.14) и по отношению к нижним зонам массива — повышенными концентрациями Na_2O (0.63–1.97) и K_2O (0.10–0.47). Вариации минерального состава отражаются на бинарных петрохимических диаграммах, которые демонстрируют отрицательные корреляции MgO с Al_2O_3 , CaO , суммой щелочей и положительную — с FeO^* . Такие соотношения являются признаками реализации механизма фракционной кристаллизации магматического расплава. Средний состав анортозитов ($n=24$) (мас.%) — SiO_2 45.99, TiO_2 0.11, Al_2O_3 29.43, Fe_2O_3 1.22, FeO 2.86, MnO 0.03, MgO 3.35, CaO 15.12, Na_2O 1.63, K_2O 0.18, P_2O_5 0.02, что отвечает нормативному составу по CIPW (%): *Pl* 86.25, *Ol* 7.46, *Or* 1.06, *Di* 1.96, *Hyp* 1.15, *Mgt* 1.77, *Ilm* 0.21, *Ap* 0.05 об.%. По отношению к породам нижних и верхних зон массива анортозиты характеризуются более высокими суммарными содержаниями редких элементов, однотипными спектрами ЭПГ и несовместимых элементов.

Распределение рудных элементов и ЭПГ связано с изменчивостью состава сульфидной составляющей и ее объема. Содержание S колеблется в пределах 0.10–1.57 мас. %, Ni — 310–3200 г/т, Cu — 315–4800 г/т, Co — 33–130 г/т. Величина отношения Cu/Ni, как правило, больше 1, что контрастно отличает анортозиты от других сульфидсодержащих пород массива. Распределение концентраций Ni, Cu, Co как в отдельности, так и в сумме обнаруживают жесткие положительные корреляционные связи с содержанием S. Суммарное содержание ЭПГ варьирует в пределах 0.235–4.663 г/т. Главными элементами являются Pt и Pd при незначительных концентрациях Rh, Ru, Ir и Os. Отношение Pt/Pd — 1.0–5.7 и только в одной пробе оно меньше 1. Отмечается четко выраженная положительная корреляция суммы Pt и Pd с содержанием S, но более жесткая положительная связь фиксируется между Pt и Cu. Платинометалльное оруденение, таким образом, тесно связано с сульфидной фазой и имеет платиновую и медную специализацию.

Рудная сидеронитовая минерализация представлена сульфидами субсолидусных превращений продуктов кристаллизации Fe-Cu-Ni-S жидкости. Основным парагенезисом является $\text{Cbn} + \text{Csp} \pm \text{Tal} + \text{Tr} \pm \text{Pn}$ с подчиненной ролью $\text{HPo} \pm \text{Tr} + \text{Pn} \pm \text{Csp}$. За счет высоких коэффициентов распределения между силикатным расплавом и сульфидной жидкостью в последней накапливаются рудные элементы и ЭПГ. Содержания рудных компонентов в пересчете на 100%-сульфид рассмотрены нами в системах Fe-Ni-S (без учета Cu) и Fe-Cu-S (без учета Ni+Co). В первом случае все анализы попали в область *mss*, во втором — *iss* и *iss+poss*. При фракционной кристаллизации, обогащенной Cu сульфидной жидкости, происходит сначала образование богатого Fe и Ni *mss* с постепенным отделением и обогащением медью расплава, последующая кристаллизация которого формирует *iss*. Эти твердые растворы с понижением температуры в дальнейшем распадаются на Po-Pn-Csp и $\text{Csp-Cbn-Pn} \pm \text{Tal}$ соответственно. В последнем также возникают решетчатые структуры распада Csp и Cbn , Csp и Tal . Средний состав *Tr* (мас.%) : Fe 63.01, Ni, 0.05, S 36.36, сумма 99.42; формула $(\text{Fe}_{0.997}\text{Ni}_{0.001})_{0.001}\text{S}_{1.002}$. Средний состав *HPo* (мас.%) : Fe 61.66, Ni, 0.12, S 37.86, сумма 99.64; формула $(\text{Fe}_{0.965}\text{Ni}_{0.002})_{0.001}\text{S}_{1.033}$. Средний состав *Cbn* (мас. %) : Cu 23.57, Fe 40.58, Ni 0.03, S 35.44, сумма 99.62; формула $\text{Cu}_{1.010}(\text{Fe}_{1.979}\text{Ni}_{0.001})_{1.980}\text{S}_{3.010}$. Все проанализированные зерна халькопирита удовлетворительно отвечают стехиометрическому составу $\text{Cu}_{0.994}\text{Fe}_{1.002}\text{S}_{2.004}$ с небольшим дефицитом по Cu. Изменчивость составов пентландита и моносulfидов железа хорошо согласуются между собой: наиболее высокие содержания Fe отмечаются для *Pn*, ассоциирующего с *Tr*, наименьшие — с *HPo*.

Дополнительно к ранее изученным минералам ЭПГ [1] выявлены туламинит — Pt_2FeCu , ниглит — $\text{Pt}(\text{Sn}, \text{Bi})$, винцентит — $(\text{Pd}, \text{Pt})_3(\text{As}, \text{Sb}, \text{Te})$, фрудит — PdBi_2 , две неизвестные фазы состава $\text{Pt}_2\text{Pd}_2\text{Sn}$ и $\text{Pd}_2(\text{Cu}, \text{Fe})_2(\text{Te}, \text{Pb}, \text{S})_3$. Кроме того, обнаружены Ge-содержащие платиноиды (первые находки в России): палладогерманит — Pd_2Ge , паоловит (8.10 мас.% Ge) и звягинцевит (0.55 мас.% Ge) [2]. Платиновая минерализация образует в анортозитах очень мелкие выделения разнообразной формы и метакристаллы, которые развиваются на контактах сульфидных минералов (чаще кубанит и халькопирит) с плагиоклазом, менее распространены метакристаллы вне сульфидов, слагая отдельные вроски и их цепочки в жилках пренита и карбонатов в пироксенах, плагиоклазе, биотите и амфиболах. При этом вокруг сульфидов наблюдаются метасоматические ореолы, в которых появляются гидроксилсодержащие пренит, цоизит, эпидот биотит, хлорит, амфиболы и уменьшается основность плагиоклаза. Биотит и амфибол (паргасит, ферроэденит) в этой ассоциации содержат 0.6–1 и 0.7–1.1 мас.% Cl, соответственно. Показательны псевдоморфозы алтаита PbTe , клаусталита PbSe и звягинцевита $(\text{Pd}, \text{Pt})_3\text{Pb}$ по галениту, маякита PdNiAs по пентландиту [2].

Анализ минеральных ассоциаций, сопровождающих формирование малосульфидного платинового оруденения в анортозитах Рифа I Йоко-Довыренского массива позволяет интерпретировать развитие платиновой минерализации как следствие всей совокупности процессов фракционной кристаллизации и дифференциации довыренского магматического расплава с отделением несмешивающейся Fe-Ni-Cu-Co сульфидной жидкости, последовательно обогащающейся в направлении анортозитов медью, хлорсодержащими летучими компонентами, Pt, Pd, Au, Te, Bi, Sn, As, Sb, Ge. Состав флюидов в монофракциях плагиоклаза (по данным газовой хроматографии) характеризуется высокими содержаниями H₂O (1,84–22,3 мл/г), а ведущими компонентами газовой фазы являются H₂ и CO₂ при подчиненной роли CO и CH₄. Таким образом, большинство минералов ЭПГ — послемагматические пневматолито-гидротермальные образования.

Кристаллизацию рудных анортозитов можно достаточно корректно рассмотреть на диаграмме An-Di-Fo (рис. 1).

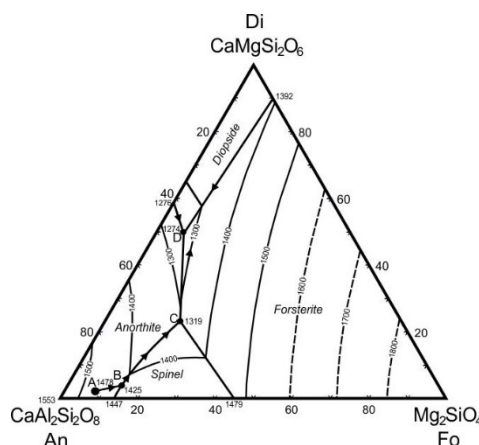


Рис. 1. Ход кристаллизации среднего состава анортозита Рифа I на тройной диаграмме An-Di-Fo

Средний состав анортозита располагается в поле анортита и поэтому первой фазой при температуре ликвидуса 1478°C будет анортит (точка A). По мере его кристаллизации состав остаточного расплава смещается в сторону линии An-Spl. В точке C (1319°C) появляется форстерит и далее в точке эвтектики D (1274°C) совместно кристаллизуются анортит, форстерит и диопсид до полного исчезновения расплава.

Литература

1. Благороднометалльная минерализация в расслоенных ультрабазит-базитовых массивах юга Сибирской платформы / Н. Д. Толстых [и др.] Новосибирск: Параллель, 2008. 194 с.
2. Палладогерманид Pt₂Ge сульфидоносных анортозитов Йоко-Довыренского интрузива — первая находка в России / Э. М. Спиридонов [и др.] // ДАН. 2018 в печати.

Орсоев Дмитрий Анатольевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Геологического института СО РАН, г. Улан-Удэ.