

ПЕТРОЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

УДК 549.324.35, 552.18 (571.53/55), 550.42, 552.311

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ ПЛАТИНОИДОВ  
ИРИДИЕВОЙ ГРУППЫ НА РАННИХ СТАДИЯХ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ  
ДОВЫРЕНСКИХ МАГМ (*Северное Прибайкалье, Россия*)

А.А. Арискин<sup>1,2</sup>, Г.С. Николаев<sup>2</sup>, Л.В. Данюшевский<sup>3</sup>, М. Фиорентини<sup>4</sup>,  
Е.В. Кислов<sup>5</sup>, И.В. Пшеницын<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119234, Москва, Ленинские горы, 1, Россия

<sup>2</sup> Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, 119991, Москва, ул. Косыгина, 19, Россия

<sup>3</sup> Centre for Ore Deposit and Earth Sciences (CODES), University of Tasmania, Hobart, TAS 7001, Australia

<sup>4</sup> Centre for Exploration Targeting, School of Earth and Environment, ARC Centre of Excellence for Core to Crust Fluid Systems, University of Western Australia, 35 Stirling Highway, Crawley, 6009, Perth, Australia

<sup>5</sup> Геологический институт СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, ба, Россия

Впервые представлено обобщение геохимических и минералогических данных, указывающих на важную роль кристаллизации Os-Ir-Ru фаз и фракционирования тугоплавких платиноидов на ранних стадиях эволюции исходных магм и примитивных кумулатов Йоко-Довыренского расслоенного массива (Северное Прибайкалье, Россия). Объектом исследования являлись два типа плагиоклазовых перидотитов из нижней части интрузива, различающиеся по пористости первичных оливиновых кумулатов: менее меланократовый (но более примитивный) тип I и более меланократовый тип II. Первые свидетельства присутствия Os-Ir-Ru фаз получены при исследованиях состава алюмохромита методом LA-ICP-MS в породах типа I и связаны с обнаружением включений тугоплавких платиноидов (Os, Ir, Ru). Последующий поиск при помощи методов электронной микроскопии позволил установить в алюмохромите из плагиоперидотитов обоих типов более 25 зерен лаурита и Ir-содержащего осмия.

В работе обсуждается значение геохимических соотношений Ru/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Ir/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в породах для разделения ранних и более поздних стадий фракционирования элементов иридиевой группы. Сформулирован вывод, что более высокие значения отношений Ru/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Ir/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в плагиоперидотитах I типа являются индикатором более высокой обогащенности алюмохромита включениями минералов тугоплавких платиноидов. Это согласуется с отнесением данных пород к фации наиболее примитивных и высокотемпературных ультрамафитов, связанных с исходной магмой, которая была в равновесии с оливином Fo<sub>88</sub> при температуре около 1290 °C. Установлено, что исходная довыренская магма была обеднена платиноидами иридиевой группы и родием еще на докамерной стадии, при отсутствии сигналов проявления ранней сульфидно-силикатной несмесимости.

*Плагиоперидотит, исходная магма, алюмохромит, платиноиды иридиевой группы, фракционирование, лаурит, иридий осмий, Довырен.*

GEOCHEMICAL EVIDENCE FOR THE FRACTIONATION OF IRIIDIUM GROUP ELEMENTS  
AT THE EARLY STAGES OF CRYSTALLIZATION OF THE DOVYREN MAGMAS  
(*northern Baikal area, Russia*)

A.A. Ariskin, G.S. Nikolaev, L.V. Danyushevsky, M. Fiorentini, E.V. Kislov, and I.V. Pshenitsyn

We have first generalized geochemical and mineralogical data indicating the important role of crystallization of Os-Ir-Ru phases and fractionation of refractory iridium subgroup of PGE (IPGE) at the early stages of the evolution of parental magmas and primitive cumulates from the Yoko-Dovyren layered massif (northern Baikal area, Russia). The object of study was two types of plagioclase peridotites from the lower part of the intrusion, differing in the porosity of primary olivine cumulates: less melanocratic (but more primitive) type I and more melanocratic type II. Inclusions of refractory IPGE (Os, Ir, and Ru) discovered during LA-ICP-MS studies of aluminochromite from type I rocks are the first evidence for the presence of Os-Ir-Ru phases. Subsequent electron microscopy examinations revealed more than 25 grains of laurite and Ir-containing osmium in aluminochromite from plagioperidotites of both types.

Attention is focused on the importance of the Ru/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Ir/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratios in rocks for the separation of IPGE at early and late fractionation stages. The conclusion is drawn that the higher Ru/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Ir/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratios in type I plagioperidotites indicate higher enrichment of aluminochromite in inclusions of refractory IPGE minerals. This is consistent with the fact that these rocks are assigned to the most primitive high-temperature ultramafites genetically related to the parental magma, which was in equilibrium with olivine Fo<sub>88</sub> at ~1290 °C. We have established that the parental Dovyren magma was already depleted in IPGE and rhodium before its entrance into a chamber. No signs of early sulfide–silicate immiscibility have been detected.

*Plagioperidotite, parental magma, aluminochromite, IPGE, fractionation, laurite, Ir-containing osmium, Dovyren*

## ВВЕДЕНИЕ

В Йоко-Довыренском расслоенном интрузиве (Северное Прибайкалье, Россия) представлено широкое разнообразие сульфидных руд и в разной степени минерализованных ультрамафитов и габброидов [Кислов, 1998; Толстых и др., 2008]. Главные типы малосульфидной минерализации включают: 1) горизонты оливиновых габбро и плагиоперидотитов с обособленными вкраплениями и гнездами сульфидно-силикатного материала в силлообразных телах придонной части массива, 2) слабоминерализованные плагиоперидотиты (80—90 % оливина) в зоне перехода к плагиоклазосодержащим дунитам [Ariskin et al., 2016] и 3) ЭПГ-минерализованные анортозиты и лейкогаббро в пограничной области между толщами троктолитов и оливиновых габбро [Дистлер, Степин, 1993; Орсов и др., 1995; Konnikov et al., 2000]. Крайне ограничена информация о других сульфидсодержащих горизонтах в габброидах верхней части интрузива [Толстых и др., 2008]. Недавно представлены свидетельства существования нового типа платинопалладиевой минерализации, ассоциирующей со шлирами сульфид-плагиоклаз-оливиновых агрегатов в низах троктолитовой зоны Йоко-Довыренского массива: этот участок разреза назван нами «Зоной Конникова» [Арискин и др., 2015; Kislov et al., 2016]. Отдельный интерес представляет зона прикровельных габброидов, содержащих до 5—7 мас. % сульфидов (рис. 1).

Причины проявления сульфидно-силикатной несмесимости и механизмы формирования малосульфидных горизонтов в породах Йоко-Довыренского массива (включая зоны ЭПГ-минерализации) остаются предметом дискуссий. Эти проблемы не решаются на основе только геологических наблюдений или минералогических исследований. Принципиальное значение имеет привлечение физико-химических методов изучения и описания сульфидно-силикатных систем. При этом одним из ключевых является вопрос о составе исходной (наиболее примитивной) несмесимой сульфидной жидкости, закономерностях ее фракционирования параллельно магматическому расплаву и составе продуктов кристаллизации на позднемагматической стадии. На эту достаточно сложную картину эволюции «закрытых по сере» магматических систем могут накладываться дополнительные сценарии, включающие реакцию сульфидов со свежими порциями базальтового расплава (возможно, ненасыщенного серой) или взаимодействие магм с вмещающими породами. В любом случае возможность физико-химических реконструкций первичного состава сульфидной жидкости и ее производных определяется наличием экспериментальных данных о разделении ЭПГ в системе сульфид—магматический расплав. Использование этой информации для интерпретации природных данных и построения геолого-петрологических моделей осложняется крайне высокими коэффициентами распределения тугоплавких платиноидов иридиевой группы (Os-Ir-Ru, температуры плавления 2700—2450 °C) и легкоплавких платиноидов платиновой группы (Rh-Pt-Pd, 1966—1555 °C) между сульфидом и силикатным расплавом. По экспериментальным данным, для Os и Ru эти значения варьируют от  $3 \times 10^4$  до  $\sim 10^6$ , для Pt и Pd преимущественно в диапазоне  $1.5 \times 10^4$ — $5.4 \times 10^5$  [Mungall, Brenan, 2014]. Эти константы показывают, что уже первые сульфидные капли практически полностью экстрагируют платиноиды из магматического расплава. Дальнейшая эволюция богатого платиноидами раннего сульфидного материала должна сопровождаться быстрым обеднением ЭПГ — как результат последовательного разбавления ранней сульфидной жидкости новообразованным сульфидом.

Эта особенность сульфидно-силикатных равновесий в закрытой магматической системе подразумевает взаимосвязь количества и состава сульфидной жидкости [Campbell, Naldrett, 1979; Leshner, Burnham, 2001]. Оба фактора имеют решающее значение при реконструкциях ранней (высокотемпературной) истории поведения ЭПГ в магматических камерах. Для последовательного описания этих соотношений необходимо максимально точное определение стадии кристаллизации, когда в продуктах эволюции исходной магмы (в частности, в затвердевающих кумулатах) началось отделение несмесимой сульфидной фазы. Решению этих задач посвящены публикации [Ariskin et al., 2016; Арискин и др., 2017]. Главным объектом исследований в этих работах явились наиболее примитивные породы Довырена, представленные пикродолеритом из зоны закалки и плагиоперидотитами подошвы массива.