

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИГМ СО РАН, при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, договора № 14.У26.31.0029.*

## Литература

*Иванов К.С., Федоров Ю.Н., Амон Э.О., Ерохин Ю.В., Бороздина Г.Н.* О возрасте и составе офиолитов фундамента Западно-Сибирского нефтегазоносного мегабассейна // Доклады Академии наук. 2007. Т. 413. № 4. С. 535–540.

*Кузоватов Н.И., Татьянин Г.М., Саев В.И.* О новой находке пикритовых порфиритов на юго-востоке Западно-Сибирской плиты // Актуальные вопросы геологии Сибири. 1988. Т. 1. С. 129–130.

*Симонов В.А., Иванов К.С., Ступаков С.И., Ерохин Ю.В., Каячев Н.Ф.* Мантийные ультрамафитовые комплексы фундамента Западно-Сибирского нефтегазоносного осадочного мегабассейна // Литосфера. 2012. № 3. С. 31–48.

*Симонов В.А., Колобов В.Ю., Пейве А.А.* Петрология и геохимия геодинамических процессов в Центральной Атлантике. Новосибирск: СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1999. 224 с.

*Симонов В.А., Конторович В.А., Котляров А.В., Сараев С.В., Филиппов Ю.Ф., Ступаков С.И.* Условия развития раннепалеозойского базальтового и пикритового магматизма Западной Сибири // Геология и геофизика. 2020. Т. 61. № 11. С. 1476–1498.

*Симонов В.А., Филиппов Ю.Ф., Котляров А.В., Сараев С.В., Ступаков С.И.* Особенности формирования пикритов в фундаменте Западно-Сибирского нефтегазоносного осадочного бассейна // Петрология магматических и метаморфических комплексов. Вып 10. Томск: Томский ЦНТИ, 2018. С. 353–354.

*Ariskin A.A., Barmina G.S.* COMAGMAT: Development of a magma crystallization model and its petrologic applications // Geochemistry International. 2004. Vol. 42 (Supp. 1). P. S1–S157.

*Danyushevsky L.V., Plechov P.Yu.* Petrolog 3: Integrated software for modeling crystallization processes // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2011. Vol. 12. #7. Q07021.

*Ridolfi F., Renzulli A.* Calcic amphiboles in calc-alkaline and alkaline magmas: thermobarometric and chemometric empirical equations valid up to 1130 °C and 2.2 GPa // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2012. Vol. 163. P. 877–895.

*Yavuz F., Yildirim D.K.* A Windows program for pyroxene-liquid thermobarometry // Periodico di Mineralogia. 2018. Vol. 87. P. 149–172.

**М.А. Юдовская**

*Институт геологии рудных месторождений,  
минералогии, петрографии и геохимии РАН, г. Москва  
Университет Витватерсранда, г. Йоханнесбург  
maiya@igem.ru*

## Реакционные структуры шпинелей и происхождение троктолитов Бушвельда, Южная Африка

Симплектиты, т. е. двух- или полифазные тонкозернистые срастания червеобразной до пластинчатой морфологии, известны в силикатных, оксидных, карбонатных, галидных, сульфатных, сульфидных и металлических минеральных системах. Шпинель-силикатные симплектиты встречаются во внеземных и земных породах, преимущественно, в составе троктолит-габбровых, троктолит-анортозитовых и троктолит-перидотитовых ассоциаций. Три основных взаимонеисключающих процесса предлагаются к настоящему времени для объяснения их образования: (1) изохимические обменные реакции в закрытой системе при распаде гомогенного предшественника, включающие окисление, дегидратацию, диффузионный обмен и др. [Khisina et al., 2013]; (2) метасоматическое замещение в условиях открытой си-

стемы при обмене с мигрирующим расплавом [Elardo et al., 2012] или флюидом [Johan et al., 2017]; (3) кристаллизацию несмешивающихся жидкостей [Holness et al., 2011]. Первая точка зрения долгое время была доминирующей, однако несоответствие масс-баланса для хромитовых симплектитов является сильным аргументом в пользу второй гипотезы. Взаимодействие с мигрирующей или захваченной жидкостью хорошо согласуется с наблюдаемыми текстурами замещения, резорбции оливина и перитектического роста пироксенов. Большинство авторов признают, что разнообразные симплектиты могут быть образованы в различных процессах и полученные выводы могут быть распространены только на специфический предмет исследования.

В настоящей работе рассматриваются шпинелевые симплектиты в породах расслоенной базит-ультрабазитовой серии Растенбург комплекса Бушвельд. Серия включает породы от дунитов и перидотитов до диоритов и магнетитового габбро в верхах разреза и подразделяется на Нижнюю, Критическую, Главную и Верхнюю зоны. Оливин+ортопироксен+хромит в различных пропорциях вплоть до их мономинеральных скоплений представляют собой доминирующую минеральную ассоциацию в основании разреза, тогда как плагиоклаз появляется в средней части Критической зоны, а хромит исчезает в ее верхах. Главная зона не содержит ни хромит, ни кумулюсный магнетит, и контакт с перекрывающей Верхней зоной четко отслеживается по появлению кумулюсного магнетита и массивных магнетитов.

Таким образом, бедные пироксеном троктолиты и троктолиты без пироксена (35–65 % оливина и плагиоклаза) являются редкими в разрезах Бушвельда. Их тонкие линзы и слои появляются в подошве Рифа Меренского, а также в проксимальных богатых оливином разрезах Псевдорифа и Тарангала Критической зоны северо-западного лимба. Троктолиты также редки в Главной и Верхней зонах восточного и западного лимбов, где они проявлены как второстепенные по объему линзы в пределах слоев оливиновых габброноритов. Наиболее мощные тела троктолитов отмечаются в северном лимбе и далее к северу на площади сегмента Ватерберг. Ортомагматическое происхождение кумулюсов Главной и Верхней зоны пока еще не оспаривается, однако миграция расплавов и флюидов через затвердевающие кумулюсы представляется фундаментальным процессом для этой части разреза. Открытие платинометалльного месторождения Ватерберг в троктолитсодержащих частях разреза [Kinnaird et al., 2017] ставит вопрос о роли миграции расплавов и флюидов в формировании этого необычного для Бушвельда оруденения, поэтому исследование реакционных текстур важно для понимания генезиса как троктолитов, так и связанной с ними минерализации.

Магматический разрез на площади Ватерберг представлен тремя основными пачками. Ультраосновная пачка в основании сложена, преимущественно, гарцбурггитами и троктолитами, которые вмещают нижнюю рудную F-зону. Выше по разрезу развита Троктолит-Анортозит-Габброноритовая пачка, к контакту которой с перекрывающей Верхней зоной также приурочена платинометалльная минерализация. Оруденение верхней T-зоны сосредоточено в литологически разнородной пачке переслаивающихся гарцбурггитов, троктолитов, габброноритов, анортозитов и их пегматоидных разновидностей. В породах T-зоны наблюдается первое появление кумулюсного магнетита, что позволяет считать минерализацию связанной с поступлением первых порций расплавов Верхней зоны Бушвельда.

В разрезе выделяется три основных типа симплектитов. Симплектиты первого типа сложены хромитом и ортопироксеном в мелатроктолитах и гарцбурггитах вблизи верхнего контакта Ультраосновной пачки. Хромит в сростаниях окружен каймой ортопироксена (рис. а), которая содержит симплектиты хромита того же состава, что и ядро. Ортопироксен в этих образцах демонстрирует ступенчатые (зубчатые) реакционные границы с оливином, где в микрокарманах между ступенями также кристаллизуются симплектиты хромита. Хромит в данном случае представлен резорбированными ксенокристаллами, физически захваченными из

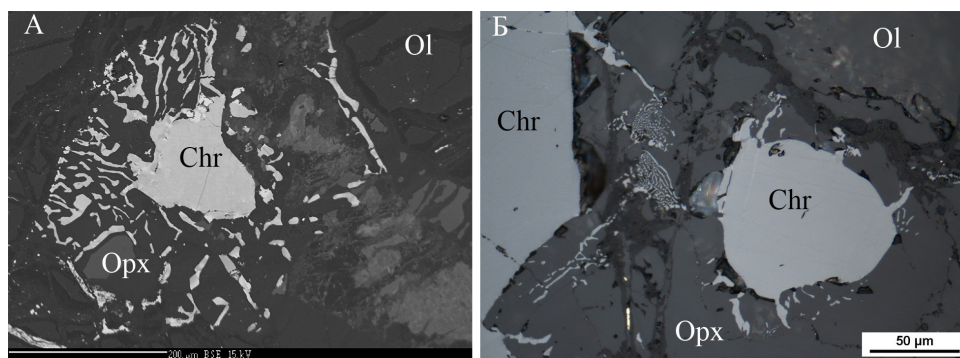


Рис. Реликтовый хромит, окруженный симплектитовой каймой ортопироксена и хромита, среди оливина: а) сегмент Ватерберг; б) подошва Рифа Меренского, Нортэм, северо-западный лимб.

нижележащих гарцбургитов низкохромистым габброидным расплавом. Эти симплектиты Ватерберга по текстуре и составу идентичны симплектитам из троктолитов подошвы Рифа Меренского в северо-западном лимбе, где хромитовые крюкообразные вростки и симплектиты ассоциируют с перитектическими каймами ортопироксена (рис. б), окружающими хромит на контакте с оливином и плагиоклазом.

Симплектиты второго типа распространены выше по разрезу, но сложены Cr-магнетитом (0.5–8 мас. %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) и ортопироксеном при полном отсутствии кумулюсных или реликтовых зерен хромита или магнетита в породах. Эти симплектиты текстурно приурочены к ступенчатым контактам между ортопироксеном и оливином.

Третий тип симплектитов сложен магнетитом и ортопироксеном и распространен в верхней части троктолит-анортозит-габброноритовой пачки, в пределах верхней минерализованной Т-зоны, а также в нижних 100–200 м перекрывающей Верхней зоны. Эти симплектиты встречаются гораздо чаще в виде прерывистых кайм, карманов и заливов вокруг оливина на контакте с плагиоклазом и в непосредственной близости к зернам кумулюсных Fe-Ti оксидов. Ортопироксен демонстрирует различные стадии замещения оливина: от тонких микронных каемок до почти полного замещения и сращивания в крупные ойкокристы. Радиальные выделения магнетита в симплеклитах распространяются от зерен кумулюсного магнетита (где они более крупнозернистые) в направлении к оливину, на контакте с которым симплектиты имеют наименьшую размерность.

Проявления всех трех типов симплектитов сопровождаются другими текстурами, свидетельствующими о неравновесности системы и незавершенных реакциях. Широко распространены зубчатые границы между пироксенами и оливином. Выше по разрезу такие же ступенчатые вростки наблюдаются для флогопита и роговой обманки, образующих зубчатые каймы вокруг оливина и пироксенов на контакте с плагиоклазом. Пироксены в таких образцах содержат субмикронные включения пластинок магнетита и ильменита. И пироксены, и плагиоклаз в таких ассоциациях демонстрируют кинк-бэнды, волнистое погасание и выклинивающиеся двойники.

Наиболее вероятно, что симплектиты всех трех типов и связанные с ними другие реакционные текстуры образовались при взаимодействии габброидных расплавов и оливинсодержащих кумулятов в резидентной камере. Их образование тесно связано с перитектическими реакциями, что свидетельствует о присутствии расплава. Химический состав шпинели отражает прогрессирующую, хотя и неравномерную дифференциацию снизу вверх, которая вызвана не эволюцией расплава в закрытой камере, а множественными внедрениями магм, дифференцированных в промежуточном очаге. Совместное присутствие оливина, шпинели

и неравновесной с ними жидкости является необходимым условием образования симплектитов. В обстановках, подобных бушвельдским разрезам, эрозия более высокомагнезиальных (и иногда более высокохромистых) резидентных кумулатов способствует кристаллизации троктолитов скорее, чем оливиновых норитов. Однако кристаллизующийся оливин неравновесен с основным объемом габброидного расплава и, тем более, с его остаточными дифференциатами, что приводит к его частичному или полному замещению.

*Исследования поддержаны РФФИ (грант № 18-05-70073).*

### Литература

*Elardo S.M., Mccubbin F.M., Shearer C.K.* Chromite symplectites in Mg-suite troctolite 76535 as evidence for infiltration metasomatism of a lunar layered intrusion // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2012. Vol. 87. P. 154–177.

*Johan Z., Martin R.F., Ettler V.* Fluids are bound to be involved in the formation of ophiolitic chromite deposits // *European Journal of Mineralogy*. 2017. Vol. 29. P. 543–555.

*Khisina N.R., Wirth R., Abart R., Rhede D., Heinrich W.* Oriented chromite-diopside symplectitic inclusions in olivine from lunar regolith delivered by “Luna-24” mission // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2013. Vol. 104. P. 84–98.

*Holness M.B., Stripp G., Humphreys M.C.S., Veksler I.V., Nielsen T.F.D., Tegner C.* Silicate liquid immiscibility within the crystal mush: late-stage magmatic microstructures in the Skaergaard intrusion, east Greenland // *Journal of Petrology*. 2011. V. 52. P. 175–222.

*Kinnaird J.A., Yudovskaya M., McCreesh M., Huthmann F., Botha T.J.* The Waterberg platinum group element deposit: atypical mineralization in mafic-ultramafic rocks of the Bushveld Complex, South Africa // *Economic Geology*. 2017. Vol. 112. P. 1367–1394.