

верхней мантии пассивной окраины и окраинно-континентального рифта; вдоль границ Магнитогорской мегазоны распространены сильно истощенные перидотиты, соответствующие рестидам основания островных дуг; массивы восточных поясов обладают преимущественно среднехромистыми составами акцессорных шпинелидов, что указывает, по-видимому, на образование их в верхней мантии задугового бассейна.

С запада на восток усиливается интенсивность проявления коровых метаморфических процессов: главными минералами серпентиновой группы в массивах Кракинского пояса и зоны ГУР являются низкотемпературные лизардит и хризотил, а большая часть массивов восточных поясов сложены антигоритом. Наибольшая интенсивность метаморфических преобразований установлена в ультрамафитах, которые расположены 1) внутри древних метаморфических комплексов, 2) в узких зонах между крупными гранитно-метаморфическими блоками, 3) вблизи крупных палеоконтинентальных блоков, насыщенных интрузиями гранитоидов, и 4) вблизи крупных интрузий гранитов.

*Исследования выполнены в рамках государственного задания по теме № 0246–2019–0078.*

## Литература

*Бажин Е.А., Савельев Д.Е., Сначев В.И.* Габбро-гипербазитовые комплексы зоны сочленения Магнитогорской и Тагильской мегазон: строение и условия формирования. Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 244 с.

*Варлаков А.С.* Петрография, петрохимия и геохимия гипербазитов Оренбургского Урала. М.: Наука, 1978. 240 с.

*Варлаков А.С.* Петрология процессов серпентинизации гипербазитов складчатых областей. Свердловск, 1986. 224 с.

*Варлаков А.С., Кузнецов Г.П., Кораблев Г.Г., Муркин В.П.* Гипербазиты Вишневогорско-Ильменогорского метаморфического комплекса (Южный Урал). Миасс, 1998. 195 с.

*Леснов Ф.П.* Редкоземельные элементы в ультрамафитовых и мафитовых породах и их минералах. Кн. 1. Главные типы пород. Породообразующие минералы. Новосибирск: Гео, 2007. 403 с.

Магматические горные породы. Т. 5. Ультраосновные породы / под ред. Е.В. Шаркова. М.: Наука, 1988. 508 с.

*Савельев Д.Е.* Хромитоносность гипербазитовых массивов Южного Урала. Дис. д-ра геол.-мин. наук. Уфа, 2012. 410 с.

*Савельев Д.Е.* Состав акцессорных хромшпинелидов из ультрабазитов Южного Урала как отражение геодинамической обстановки формирования массивов // Вестник Пермского университета. Геология. 2013. № 1. С. 17–25.

**В.А. Симонов<sup>1,2,3</sup>, А.В. Котляров<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup> – *Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск  
simonov@igm.nsc.ru, kotlyarov@igm.nsc.ru*

<sup>2</sup> – *Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск*

<sup>3</sup> – *Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань*

## **Особенности формирования палеозойских палеоокеанических клинопироксенсодержащих ультрамафитовых комплексов Западной Сибири**

Большинство ультрабазитов Западной Сибири представляют собой дунит-гарцбургитовый комплекс офиолитовых ассоциаций [Иванов и др., 2007; Симонов и др., 2012] и при-

влекают к себе внимание в связи с тем, что, являясь фрагментами структур древних океанов, они позволяют рассмотреть геодинамическую эволюцию фундамента Западно-Сибирского нефтегазоносного осадочного бассейна на наиболее ранних стадиях его развития. Гораздо реже в фундаменте Западной Сибири встречается другой тип ультраосновных пород, представленный пикритами [Кузоватов и др., 1988; Симонов и др., 2018], формирование которого связано с развитием сложной субдукционной зоны древнего океана [Симонов и др., 2020]. Исследования показали, что эти офиолитовые и пикритовые ультрамафиты имеют палеозойский возраст [Иванов и др., 2007; Симонов и др., 2020].

При выяснении особенностей формирования рассмотренных ультрабазитов Западной Сибири существенную роль играет присутствие в них клинопироксена. В целом, условия кристаллизации клинопироксеносодержащих ультрамафитовых комплексов фундамента Западно-Сибирского осадочного бассейна установлены в результате изучения первичных минералов (хромшпинелиды, оливины, клинопироксены, амфиболы) и обработки полученной информации с помощью современных расчетных программ. При этом большое значение имеют геохимические данные по распределению РЗЭ в минералах и ультраосновных породах. Вся полученная информация по ультрамафитам Западной Сибири рассмотрена в сравнительном анализе с данными по эталонным объектам, представляющим структуры древних (офиолиты Урала и Сибири) и современных (Атлантический и Тихий океаны) океанических областей.

Настоящая работа является продолжением исследований ультраосновных комплексов Западной Сибири и содержит результаты обработки оригинальных (в том числе и частично ранее опубликованных) данных, полученных при исследовании клинопироксеносодержащих перидотитов Хултурского массива (скважина 10367) и пикритов Чкаловской площади (скважина Чкаловская 11). Исследования ультрамафитов из фундамента Западной Сибири проводились в Институте геологии и минералогии СО РАН (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск). Анализы составов минералов и пород были выполнены в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск) и в ИГМ СО РАН.

Среди первичных минералов в ультрамафитах фундамента Западной Сибири особую роль играют клинопироксены, присутствующие как в офиолитовых ультрабазитах, так и в пикритах. Большое значение имеют хромшпинелиды, сохранившиеся даже в полностью серпентинизированных ультрабазитах. Оливины позволили получить важную информацию об условиях формирования перидотитов. Амфиболы, развивающиеся по клинопироксенам, дали возможность установить параметры заключительных стадий магматической кристаллизации пикритов.

Установлено, что *клинопироксены* из перидотитов Хултурского массива связаны с «океаническим» трендом (срединно-океанических хребтов), а клинопироксены из пикритов Чкаловской площади – «островодужно-плюмовым». При этом клинопироксены Хултурского массива с одной стороны близки к данным по минералам из ультрабазитов эталонных офиолитов (Полярный Урал), а с другой – явно отличаются от пироксенов из преобладающих в фундаменте Западной Сибири интенсивно серпентинизированных ультрабазитов.

Составы *хромшпинелидов* свидетельствуют о том, что эволюция ультраосновных комплексов фундамента Западной Сибири происходила (также как и в случае типичных офиолитовых ассоциаций) при смене геодинамической ситуации от океанической до островодужной. При этом клинопироксеносодержащие парагенезисы формировались как в начале (океан), так и в конце (островная дуга) истории развития ультрамафитов.

*Оливины*, составляющие существенную часть клинопироксеносодержащих перидотитов Хултурского массива, содержат 88.7–89.7 % форстеритового компонента и по этой характеристике соответствуют минералам из ультраосновных пород Срединно-Атлантического хребта, отличаясь от оливинов из ультрамафитов субдукционных зон (глубоководных желобов) и

древних офиолитов Алтае-Саянской области, для которых характерна более высокая магнезиальность.

Спектры РЗЭ для *клинопироксенов* из перидотитов Хултурского массива обладают резким положительным наклоном с явным истощением легкими компонентами, и по форме близки к графикам пироксенов в ультрамафитах из современных и древних (офиолиты) океанических структур. Они практически совпадают с полем клинопироксенов из ультраосновных пород зоны разлома Вима (Срединно-Атлантический хребет) и имеют определенные отличия от данных по минералам из ультрамафитов офиолитов Полярного Урала в области тяжелых лантаноидов. Спектры распределения РЗЭ в перидотитах Хултурского массива (содержащих клинопироксен) имеют положительный наклон, близки по форме к графикам нормальных базальтов срединно-океанических хребтов и располагаются в поле абиссальных (океанических) перидотитов. Спектры распределения РЗЭ пикритовых порфиритов Чкаловской площади обладают отрицательным наклоном и заметным обогащением легкими лантаноидами. Они находятся в поле обогащенных легкими лантаноидами пикритов Камчатки и близки к полю пикритов Гавайских островов.

В целом, результаты изучения особенностей распределения РЗЭ подтверждают информацию, полученную при анализе минералов. Прежде всего, РЗЭ (как и данные по клинопироксенам) отчетливо свидетельствуют об участии магматических систем срединно-океанических хребтов при формировании клинопироксенсодержащих перидотитов в отличие от пикритов, для которых характерны островодужные и плюмовые расплавы. Также, РЗЭ (как и хромшилелиды) показывают эволюцию характеристик офиолитовых ультрабазитов Западной Сибири от океанических к раннеостроводужным (с бонинитами).

Для моделирования условий кристаллизации *клинопироксенсодержащих перидотитов* Хултурского массива по программе COMAGMAT [Ariskin, Barmina, 2004] состав исходного расплава был установлен на основе данных по соотношениям первичных минералов (оливин, ортопироксен, клинопироксен) в шлифах. Наиболее согласующиеся результаты получены при использовании состава высокомагнезиального (34.6 мас. % MgO) расплава, оцененного по шлифу со следующими соотношениями минералов: оливин (39 %) + ортопироксен (38 %) + клинопироксен (24 %). Расчеты проводились для равновесной декомпрессионной кристаллизации от 10 кбар, буфер QFM,  $dP/dF = 0.1 \text{ mol}$ , содержание воды 0.2 мас. % согласно данным по нормальным магматическим системам типа N-MORB в Срединно-Атлантическом хребте [Симонов и др., 1999]. В результате установлено, что оливины, ортопироксены и клинопироксены начинали кристаллизоваться при температурах 1555, 1330 и 1260 °C (9.4, 3.8 и 2.6 кбар), соответственно.

Расчеты ликвидусных параметров образования минералов с использованием программы PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011] на основе состава расплава начала кристаллизации клинопироксена, полученного с помощью COMAGMAT, показали, что температуры формирования клинопироксена при 2.6 кбар составляли 1225–1285 °C.

В целом, имеющиеся данные свидетельствуют о том, что клинопироксенсодержащие перидотиты Хултурского массива формировались при последовательной (в ходе падения давления от 9.4 до 2.6 кбар) кристаллизации минералов: оливин (начало образования 1555 °C) – ортопироксен (1330 °C) – клинопироксен (1285–1225 °C).

Определение PT-параметров кристаллизации *пикритовых порфиритов* проведено с использованием программ WinPLtb [Yavuz, Yildirim, 2018], PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011] COMAGMAT [Ariskin, Barmina, 2004] и амфиболового термобарометра [Ridolfi, Renzulli, 2012]. Пикритовые порфириты Чкаловской площади формировались при последовательной кристаллизации минералов: оливин (1540–1490 °C, 12.8–7.0 кбар) – клинопироксен (1315–1215 °C, 8.0–4.5 кбар) – амфибол (1105–1060 °C, 4.5–6.1 кбар).

*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-