

УДК 548.4

## ЭВОЛЮЦИЯ ВЫСОКОМАГНЕЗИАЛЬНЫХ РАСПЛАВОВ В ПРОЦЕССАХ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПОРОД УЛЬТРАМАФИТОВЫХ МАССИВОВ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

В. А. Симонов<sup>1,2</sup>, Ю. Р. Васильев<sup>1,2,\*</sup>, А. В. Котляров<sup>1,\*\*</sup>, В. С. Приходько<sup>3</sup>

Представлено академиком РАН Н.В. Соболевым 25.09.2017 г.

Поступило 26.09.2017 г.

В результате исследования первичных расплавных включений в аксессуарных хромшпинелидах из дунитов были выяснены особенности химического состава высокомагнезиальных пикрит-базальтовых расплавов, формировавших ультрамафитовые массивы Сибирской платформы. С помощью расчётного моделирования (программы PETROLOG и PLUTON) на основе данных по составу включений определены температуры кристаллизации оливинов из дунитов Гулинского (1520–1420 °С), Кондёрского (1545–1430 °С), Инаглинского (1530–1430 °С), Чадского (1460–1420 °С) массивов, а также хромшпинелидов из этих же комплексов: Гулинский (1410–1370 °С), Кондёрский (1420–1380 °С), Инаглинский (до 1430 °С), Чадский (1430–1330 °С). В целом расчётное моделирование позволило установить, что на Сибирской платформе существовали два типа эволюции высокомагнезиальных расплавов. Первый тип характерен для Гулинского плутона, где наблюдается следующая последовательность формирования: дуниты → пироксениты → щелочные породы. Второй тип представлен Кондёрским массивом, в котором последовательность иная: дуниты → косциты → пироксениты и оливин-диопсидовые породы.

*Ключевые слова:* высокомагнезиальные расплавы, ультрамафитовые массивы, расплавные включения, расчётное моделирование, Сибирская платформа.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524872203-207>

Исследования условий формирования ультрамафитовых массивов Сибирской платформы имеют большое значение в связи с актуальными проблемами глубинного мантийного ультраосновного магматизма, а также благодаря приуроченности к этим комплексам промышленных концентраций платиноидов. Изучение расплавных включений в аксессуарных хромшпинелидах позволило выяснить условия кристаллизации дунитов концентрически-зональных платиноносных массивов (Кондёрский, Инаглинский и Чадский) юго-востока Сибирской платформы [1], а также дунитов Гулинского массива на севере Сибирской платформы [2–4]. Обобщение оригинальных и литературных данных позволило с помощью компьютерных программ наиболее обоснованно рассмотреть особенности эволюции высокомагнезиальных расплавов в процессах кристал-

лизации пород ультрамафитовых массивов Сибирской платформы.

Исследования расплавных включений в хромшпинелидах проводились с использованием оригинальной методики [1, 4] в Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (ИГМ СО РАН, Новосибирск). Стёкла прогретых включений анализировались на микроанализаторе Camebax-Micro, а также с помощью электронных сканирующих микроскопов LEO 1430 VP [(Leo Electron Microscopy Ltd) с системой микроанализа INCA Energy 350x3 Premium (Oxford Instruments Ltd)] и MIRA 3 LMU [(Tescan Orsay Holding) с системой микроанализа INCA Energy 450+XMax 80 (Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd)] в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН. Содержания редкоземельных элементов и воды в стёклах включений определены методом вторично-ионной масс-спектрометрии на ионном микроанализаторе IMS-4f в Ярославском филиале Физико-технологического института РАН по методике [5].

Геологические особенности ультрамафитовых массивов Сибирской платформы рассмотрены во многих публикациях и приведены нами ранее [1–4].

В результате исследования первичных расплавных включений в аксессуарных хромшпинелидах

<sup>1</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской Академии наук, Новосибирск

<sup>2</sup> Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

<sup>3</sup> Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Хабаровск

\*E-mail: [meimech@igm.nsc.ru](mailto:meimech@igm.nsc.ru)

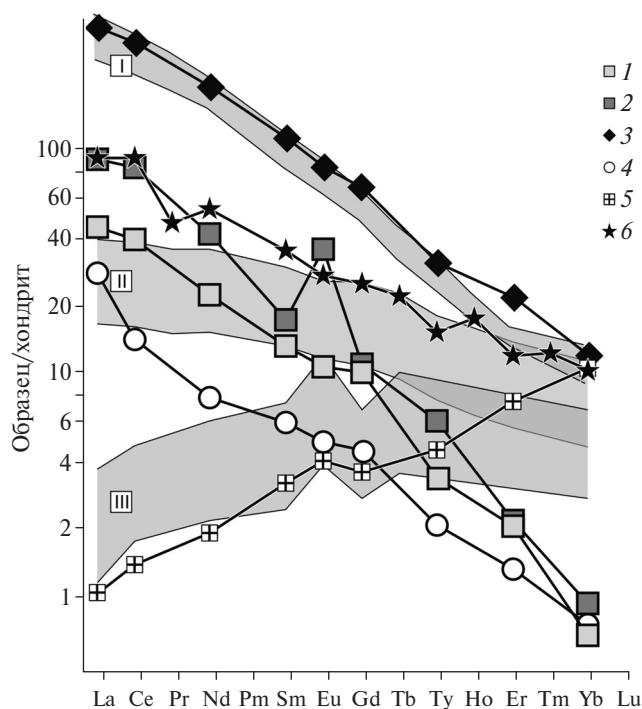
\*\*E-mail: [kotlyarov@igm.nsc.ru](mailto:kotlyarov@igm.nsc.ru)

из дунитов были выяснены особенности химического состава высокомагнезиальных пикрит-базальтовых расплавов, формировавших ультрамафитовые массивы Сибирской платформы. Явно обособляются высокотитанистые магмы Гулинского плутона. Расплавы Инаглинского массива выделяются сочетанием относительно повышенных содержаний титана и калия на фоне низких значений  $\text{SiO}_2$ . Магмы массива Чад характеризуются существенно меньшими содержаниями титана и калия на фоне повышенных значений  $\text{SiO}_2$ . Данные по Кондёрскому массиву занимают промежуточное положение, соответствуя в целом составам расплавных включений из платиноносного Нижнетагильского массива (Урал).

Изучение прогретых расплавных включений в хромшпинелидах с помощью ионного зонда позволило получить информацию о содержании редкоземельных элементов (РЗЭ) и воды в расплавах ультрамафитовых массивов Сибирской платформы. Графики распределения РЗЭ для включений обладают отчётливо выраженным отрицательным наклоном с обогащением лёгкими лантаноидами (рис. 1). Наиболее обогащённые расплавы Гулинского массива совпадают с данными по включениям в оливинах из меймечитов Сибирской платформы. Спектры включений в хромитах из Кондёрского и Инаглинского массивов показывают меньшие содержания РЗЭ, близких к графикам включений из эталонного платиноносного Нижнетагильского массива, и ассоциируют с данными по плюмовым расплавам океанических островов (ОИВ) и континентальных “горячих точек”. В то же время рассмотренные включения резко отличаются от включений в хромшпинелидах из палеоокеанических комплексов Карашатского массива, для которых характерны графики с положительным наклоном (рис. 1).

Содержания воды в стёклах прогретых включений в хромшпинелидах из массивов Сибирской платформы близки между собой: Кондёрский — до 0,53 мас.%, Инаглинский — до 0,63 мас.% и Гулинский — до 0,76 мас.%.

Для определения температурного режима кристаллизации пород, а также с целью выяснения эволюции магматических расплавов, формировавших ультрамафитовые массивы Сибирской платформы, было проведено расчётное моделирование с использованием программ PETROLOG [10] и PLUTON [11] на основе данных по составам расплавных включений. Наиболее детально особенности расплавов рассмотрены для Гулинского и Кондёрского массивов. В случае программы PETROLOG применялся буфер QFM. Давление задавалось 4 кбар. Содержа-



**Рис. 1.** Распределение редкоземельных элементов (РЗЭ) в прогретых расплавных включениях в хромшпинелидах из дунитов ультрамафитовых массивов Сибирской платформы. 1–5 — средние значения РЗЭ во включениях из дунитов Кондёрского (1), Инаглинского (2), Гулинского (3), Нижнетагильского (4) и Карашатского (5) массивов; 6 — включения и стёкла из пород континентальных “горячих точек”. Поля: включений в оливине меймечитов (I), пикритов Гавайских островов (II) и габбро Срединно-Атлантического хребта (III). Значения элементов нормированы к составу хондрита согласно [6]. Рисунок составлен на основе оригинальных данных с использованием материалов [7–9].

ние воды использовалось согласно результатам анализа включений. При расчётах по программе PLUTON были использованы те же данные (включая  $\text{H}_2\text{O}$ ) по составам расплавных включений, что и в случае программы PETROLOG при близких значениях давления — 3,3 кбар.

В результате расчётного моделирования по программе PETROLOG для дунитов Гулинского плутона установлены высокие температуры ликвидусной кристаллизации оливинов из пикритового расплава — 1520–1420 °С. Эти уточнённые параметры, занимая промежуточную позицию между ранее опубликованными данными [3, 4], согласуются с температурами кристаллизации оливинов из меймечитов (1600–1420 °С) [7, 12]. Близкие температуры кристаллизации оливинов пикритовых и пикробазальтовых магм получены для оливинов Кондёрского (1545–1430 °С) и Инаглинского (1530–1430 °С) массивов. Более низкие параметры характерны для Чадского (1460–1420 °С)

массива. По расчётным данным хромшпинелиды рассмотренных массивов кристаллизовались при более низких температурах: Гулинский (1410–1370 °C), Кондёрский (1420–1380 °C), Инаглинский (до 1430 °C), Чадский (1430–1330 °C).

В случае Гулинского массива расчёты по программе PLUTON фракционной кристаллизации для включений с пикритовым (42,7 мас.% SiO<sub>2</sub> и 25,1 мас.% MgO) валовым химическим составом (со структурами “спинифекс”) показали начало кристаллизации оливинов около 1440 °C, что соответствует данным, полученным по программе PETROLOG (1520–1420 °C). Оливины продолжали накапливаться при снижении температуры. С температуры 1215 °C кристаллизуются только клинопироксены. При этом наблюдается резкий перелом в эволюции состава расплава: рост SiO<sub>2</sub> сменяется падением его содержания в ходе дальнейшего снижения температуры (рис. 2).

Для Кондёрского массива расчёты по программе PLUTON фракционной кристаллизации для включений с пикритовым (42,3 мас.% SiO<sub>2</sub> и 24,8 мас.% MgO) и пикробазальтовым (43,5 мас.% SiO<sub>2</sub> и 13,8 мас.% MgO) химическими составами показали начало кристаллизации оливинов соответственно около 1545 °C (рис. 2) и 1435 °C, что также согласуется с данными, полученными по PETROLOG (1530 °C и 1430 °C). При снижении температуры оливины продолжают накапливаться. С температуры 1140 °C кристаллизуются исключительно клинопироксены (рис. 2). При этом, так же, как и в случае Гулинского массива, наблюдается падение содержания SiO<sub>2</sub> в расплаве.

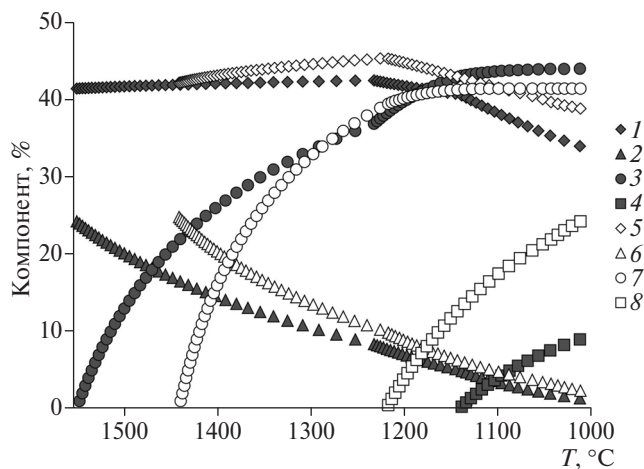


Рис. 2. Фракционная кристаллизация пикритовых расплавов Кондёрского (1–4) и Гулинского (5–8) массивов. Компонент — содержание в расплаве: 1,5 — SiO<sub>2</sub>; 2,6 — MgO; 3,7 — оливин; 4,8 — клинопироксен.

Кардинальная смена направления эволюции высокомагнезиальных пикритовых расплавов Гулинского плутона хорошо видна на диаграмме MgO — SiO<sub>2</sub> (рис. 3). Здесь тренд падения содержания магния на фоне роста кремнекислоты в расплаве от пикритов через пикробазальты к оливиновым базальтам (прослеживаемый данными по расплавленным включениям) резко меняет своё направление на противоположное с уменьшением SiO<sub>2</sub>, также сопровождаясь точками составов расплавленных включений. С этой реверсивной частью тесно ассоциируют составы щелочных пород Гулинского массива, а также расплавленных включений в клинопироксенах из этих пород (рис. 3). При этом оценки температур кристаллизации щелочных пород, сделанные нами на основе расчётного моделирования (1200–1090 °C), хорошо согласуются с данными других исследователей [15].

Необходимо отметить, что расплавленные включения в хромшпинелидах фиксируют не только реверсивный тренд, но и показывают также дальнейший рост SiO<sub>2</sub>. Для выяснения особенностей эволюции расплавов в этом направлении были проведены расчёты по программе PLUTON на основе данных по стёклам прогретых гомогенных включений. В результате было выяснено, что, несмотря на близкие

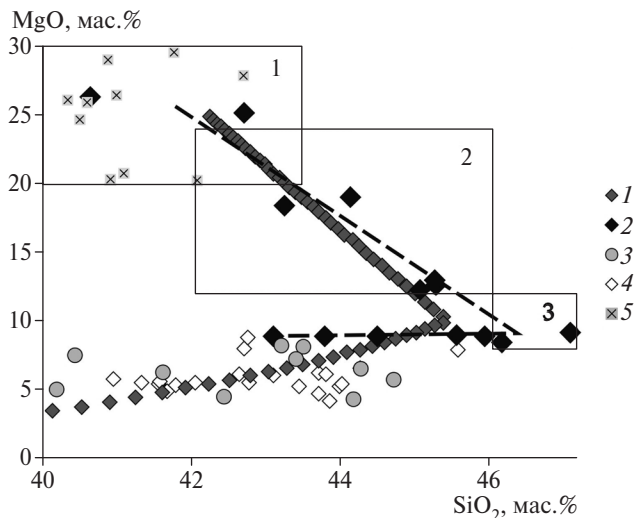


Рис. 3. Эволюция состава пикритового расплава в ходе его фракционной кристаллизации при формировании Гулинского массива. 1 — расплав; 2 — расплавленные включения в хромшпинелидах Гулинского массива; 3 — расплавленные включения в клинопироксенах из меланефелинитов Гулинского массива; 4 — щелочные породы Гулинского массива; 5 — пикритовые порфиры Маймеча-Котуйского района. Поля составов пород: 1 — пикриты, 2 — пикробазальты, 3 — оливиновые базальты. Рисунок составлен на основе оригинальных данных с использованием материалов [4, 13, 14].



содержания  $\text{SiO}_2$  и  $\text{MgO}$ , характер эволюции при снижении температуры иной, чем в случае включений со структурами “спинифекс”. Видно изменение характеристик около  $1125^\circ\text{C}$ : снижение  $\text{SiO}_2$  сменяется ростом, а также падают содержания  $\text{TiO}_2$  и особенно  $\text{FeO}$  на фоне повышения темпов кристаллизации клинопироксена (рис. 4). В то время как в случае включений со структурами “спинифекс” наблюдается равномерный рост характеристик компонентов при явно более высоких содержаниях в расплаве титана, щелочей и минимальных количествах железа.

В целом для Гулинского массива мы видим кристаллизацию клинопироксенов из трёх различных по составу расплавов, образующихся в ходе эволюции пикритовой магмы. Для структуры “спинифекс” пироксены кристаллизовались из высокотитанистых и низкожелезистых расплавов (рис. 4). В другом случае, начиная с температуры  $1210^\circ\text{C}$ , пироксены кристаллизовались из высокожелезистого и с повышенным титаном расплава. Далее (с  $1125^\circ\text{C}$ ) в расплаве существенно падает количество железа и уменьшается содержание титана (рис. 4). Учитывая то, что клинопироксены равновесны с расплавом, мы можем полученные результаты расчётов связать с реальными объектами. В частности, на диаграмме  $\text{TiO}_2$ – $\text{FeO}$  для клинопироксенов из пород Гулинского массива [4] минимум титана при падающих средних значениях железа содержат клинопи-

роксены из пироксенитов. Таким образом, при температурах начиная с  $1125^\circ\text{C}$  формировались клинопироксениты.

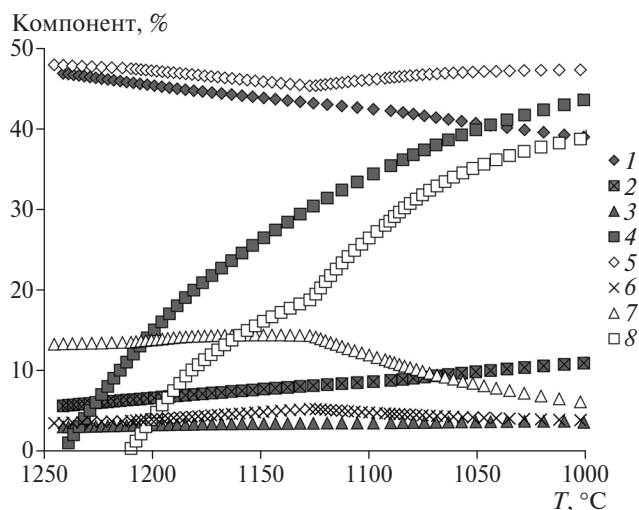
Для Кондёрского массива расчёты по программе PLUTON показали, что после завершения кристаллизации основной массы оливинов из пикробазальтового расплава (начиная с  $1350^\circ\text{C}$ ) формировались косьвиты, а при снижении параметров (с  $1270^\circ\text{C}$ ) кристаллизовались клинопироксены в дунитах. Расплавы состава оливинового базальта, завершающие процессы формирования массива, кристаллизовались с образованием (с  $1250^\circ\text{C}$ ) клинопироксенов и в меньшей степени оливинов, входящих в состав пироксенитов и оливин-диопсидовых пород.

В целом расчётное моделирование позволило установить, что на Сибирской платформе существовали два типа эволюции высокомагнезиальных расплавов. Первый тип характерен для Гулинского плутона, где наблюдается следующая последовательность формирования: дуниты → пироксениты → щелочные породы. Второй тип представлен Кондёрским массивом, в котором последовательность иная: дуниты → косьвиты → пироксениты и оливин-диопсидовые породы. Такая расчётная эволюция близка к реально наблюдаемой в природных объектах последовательности формирования пород.

**Источники финансирования.** Работа выполнена в рамках государственного задания ИГМ СО РАН № 0330–2016–0014 и при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Симонов В.А., Приходько В.С., Ковязин С.В. // Петрология. 2011. Т. 19. № 6. С. 579–598.
2. Соболев Н.В., Логвинова А.М., Николенко Е.И., Лобанов С.С. // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 8. С. 1162–1178.
3. Симонов В.А., Васильев Ю.Р., Ступаков С.И., Котляров А.В., Карманов Н.С. // ДАН. 2015. Т. 464. № 3. С. 341–345.
4. Симонов В.А., Васильев Ю.Р., Ступаков С.И., Котляров А.В., Карманов Н.С. // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 12. С. 2153–2177.
5. Соболев А.В. // Петрология. 1996. Т. 4. С. 228–239.
6. Boynton W.V. Rare Earth Element Geochemistry. L.: Elsevier, 1984. P. 63–114.
7. Соболев А.В., Соболев С.В., Кузьмин Д.В., Малич К.Н., Петрунин А.Г. // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 12. С. 1293–1334.
8. Наумов В.Б., Коваленко В.И., Дорофеева В.А., Гирнис А.В., Ярмолюк В.В. // Геохимия. 2010. № 12. С. 1266–1288.



**Рис. 4.** Фракционная кристаллизация расплавов Гулинского массива, отвечающих по химическому составу оливиновым базальтам. Кристаллизация расплавов, обладающих химическим составом структуры “спинифекс” во включениях (1–4) и составом стекла гомогенных прогретых включений (5–8). Компонент — содержание в расплаве: 1,5 —  $\text{SiO}_2$ ; 2,6 —  $\text{TiO}_2$ ; 3,7 —  $\text{FeO}$ ; 4,8 — клинопироксен.

9. *Norman M.D., Garcia M.O.* // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1999. V. 168. P. 27–44.
10. *Danyushevsky L.V., Plechov P.Yu.* // *Geochem., Geophys., Geosyst.* 2011. V. 12. № 7. Q07021. DOI: 10.1029/2011GC003516.
11. *Лавренчук А.В.* В сб.: Тез. докл. Второй Сибирской междунар. конф. молодых учёных по наукам о Земле. Новосибирск, 2004. С. 105–106.
12. *Соболев А.В., Каменецкий В.С., Кононкова Н.Н.* // *Геохимия.* 1991. № 8. С. 1084–1095.
13. *Егоров Л.С.* Ийолит-карбонатитовый плутонизм. Л.: Недра, 1991. 260 с.
14. *Panina L.I., Motorina I.V.* // *Geochem. Int.* 2013. V. 51. P. 109–128.
15. *Панина Л.И.* В кн.: *Науки о Земле.* М.: Науч. мир, 2006. С. 106–107.

## EVOLUTION OF HIGH MAGNESIAN MELTS DURING PROCESSES OF CRYSTALLIZATION OF ROCKS FROM THE ULTRAMAFIC MASSIFS OF THE SIBERIAN PLATFORM

V. A. Simonov<sup>1,2</sup>, Yu. R. Vasiliev<sup>1,2</sup>, A. V. Kotlyarov<sup>1</sup>, V. S. Prihodko<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

<sup>2</sup> *Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation*

<sup>3</sup> *Yu. A. Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation*

Presented by Academician of the RAS N.V. Sobolev September 25, 2017

Received September 26, 2017

We determined the chemical composition of high-mg picrite-basaltic melts that formed the ultramafic massifs of the Siberian platform in the study of primary melt inclusions in accessory chrome spinel from dunites. We determined the temperature of crystallization of olivine from dunites of the Gulinsky (1520–1420 °C), Kondersky (1545–1430 °C), Inaglinsky (1530–1430 °C), Chadsky (1460–1420 °C) intrusives and chrome spinels of these complexes: Gulinsky (1410–1370 °C), Kondersky (1420–1380 °C), Inaglinsky (up to 1430 °C), Chadsky (1430–1330 °C), using a computer simulation (program PETROLOG and PLUTON) on the basis of data on the composition of the inclusions. The computational modeling allowed us to establish that there were two types of high-magnesium melt evolution on the Siberian platform. The first type is characteristic of the Gulinsky pluton, where there is the following sequence of formation: the dunites → pyroxenites → alkaline rocks. The second type is represented Kondersky massif, where the sequence is different: dunites → kosvites → pyroxenites and olivine-diopside rocks.

*Keywords:* high magnesian melts, ultramafic massifs, melt inclusions, computational modeling, Siberian Platform.