

УДК 550.41, 550.424.4, 552.321.5/6

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕТРОГЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ НА РАСТВОРИМОСТЬ ХРОМШПИНЕЛИДА В РАСПЛАВЕ И ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ХРОМИТИТОВ

Г. С. Николаев^{1,*}, А. А. Арискин^{1,2}, Г. С. Бармина¹

Представлено академиком РАН А.В. Соболевым 05.02.2019 г.

Поступило 05.02.2019 г.

Используя новую модель равновесия шпинелид—расплав SPINMELT-2.0, проведён анализ влияния вариаций *fo*-, *fa*-, *en*-, *fs*-, *di*-, *an*- и *ab*-компонентов в высоко-Mg-базальтовом расплаве на топологию ликвидуса шпинелида. Установлено, что обогащение расплава клинопироксеновым компонентом приводит к повышению, а плагиоклазового — к понижению растворимости хромита. Этот эффект может иметь важное значение в условиях гравитационной усадки кумулатов, сопровождающейся отжимом интеркумулусного расплава и его направленной вверх инфильтрацией. При этом можно ожидать последовательное переуравновешивание инфильтрирующегося расплава с различными по составу кумулятивными толщами. Это позволяет предполагать возможность переноса и нового концентрирования хромшпинелида на посткумулусном этапе затвердевания расслоённых интрузивов. Природа концентрирования заключается в экстракции хромшпинелида в расплав, обогащённый пироксеновым компонентом, с последующим его сбросом при реакции этого расплава с полевошпатовой матрицей протанортозитовых прослоев. О реалистичности предложенного механизма свидетельствует пространственная связь хромититовых прослоев с анортозитами интрузива о. Рам и в Бушвельдском комплексе.

Ключевые слова: равновесие хромшпинелид—расплав, геотермометр, ликвидус хромита, стратиформные хромититы, кумулат, магматический метасоматоз, Бушвельд.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652487178-81>

Поиски решения проблемы происхождения хромититов в стратиформных ультрамафит-мафитовых комплексах продолжают не один десяток лет. За это время только основных гипотез без учёта модификаций выдвинуто более десятка (см. обзор в [1]). Большинство исследователей придерживается разных вариантов гипотезы образования хромититов в результате накопления кумулусного хромита [2–4]. При этом механизм образования слоя хромититов связывают с кратковременным процессом одноактного понижения растворимости шпинелида в магме под действием того или иного фактора. В последнее десятилетие предложены модели, в основе которых явления перекристаллизация кумулятивных толщ *in situ* [5–7]. В обобщающей статье [8] это направление представлено наиболее последовательно с привлечением элементов магматического метасоматоза. Общим для большинства гипотез является эпизодическое пополнение магматической камеры

примитивным расплавом, который является источником кристаллизующегося хромита.

Со времён Ирвайна [2] для большинства гипотез физико-химическая аргументация сводилась к анализу диаграмм состояния гаплобазальтовых систем. Только в единичных исследованиях [1, 4, 5, 7] использовалось термодинамическое моделирование кристаллизации хромита в многокомпонентных системах с помощью программы MELTS и её производных [9]. В частности, в работе [5] исследовано влияние воды на фазовые равновесия в магме при образовании рифа Меренского, а в исследовании [7], посвящённом происхождению тонких хромититовых прослоев интрузива о. Рам, результаты экспериментов дополнены расчётами по программе MELTS.

Т. Надретт с коллегами [1] для модельного состава В1 [10], который представляет один из вариантов Бушвельдской магмы, по программе MELTS рассчитали серии изоплет и изобар, описывающие топологию ликвидусной поверхности шпинелида. При этом исследовано влияние содержания хрома, давления, окислительного потенциала и активности кремнезёма на условия кристаллизации алюмохромита. Как результат, вывод о низкой эффективности,

¹ Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской Академии наук, Москва

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

*E-mail: gsnikolaev@rambler.ru

а в некоторых случаях — несостоятельности выдвинутых гипотез.

Главными проблемами предложенных на сегодняшний день механизмов образования пластовых хромититов представляются их малая продуктивность и элемент случайности, который привносят в процесс рудогенеза дополнительные внедрения. По нашему мнению, наиболее перспективным направлением приложения усилий является систематическое исследование топологии ликвидуса хромшпинелида на основе численного моделирования его кристаллизации из многокомпонентных расплавов, приближённых к реальным магмам. Это позволит выявить факторы, влияющие на растворимость хромита и обеспечивающие его перенос и концентрирование.

Программа SPINMELT-2.0, которая использовалась нами при расчётах, — новая высокобарная версия [11] численной модели для расчёта ликвидусных температуры и состава хромшпинелида в широком диапазоне составов базальтовых магм нормальной щёлочности. Верификация модели на соответствие принципу кислотно-основного взаимодействия [12] показала, что модельные тенденции соответствуют этой фундаментальной закономерности, которая не использовалась при формулировке модели [13].

Моделирование влияния петрогенных компонентов расплава на кристаллизацию шпинелида проводилось путём расчёта его ликвидусной поверхности и состава для серии расплавов, производных от модельного состава B1 [10] (мас.%): SiO₂ 56,09; TiO₂ 0,28; Al₂O₃ 11,31; FeO* 9,17; MnO 0,17; MgO 13,58; CaO 6,34; Na₂O 1,43; K₂O 1,05; P₂O₅ 0,07. Содержание хрома было принято 0,22 мас.%. Влияние вариаций основных петрогенных компонентов (*fo*, *fa*, *en*, *fs*, *di*, *an*, *ab*) моделировалось путём последовательного добавления или вычитания рассматриваемого компонента к составу базового расплава с шагом в 5 мас.%. Изменяя каждый из факторов, рассчитывались $T-f_{O_2}$ параметры насыщения модельного расплава шпинелевой фазой и её модельные составы. Результаты расчётов представлены на рис. 1, 2.

В результате расчётов установлено, что оливиновые компоненты (*fo*, *fa*) слабо влияют на температуру ликвидуса хромшпинелида, но при этом значительно сказываются на показателе его магнезиальности (*mg#*). Добавление к расплаву *en*- и *fs*-компонентов оказывает незначительный эффект на состав шпинелида и вызывает слабое понижение ликвидусной температуры. Увеличение количества *di* в расплаве

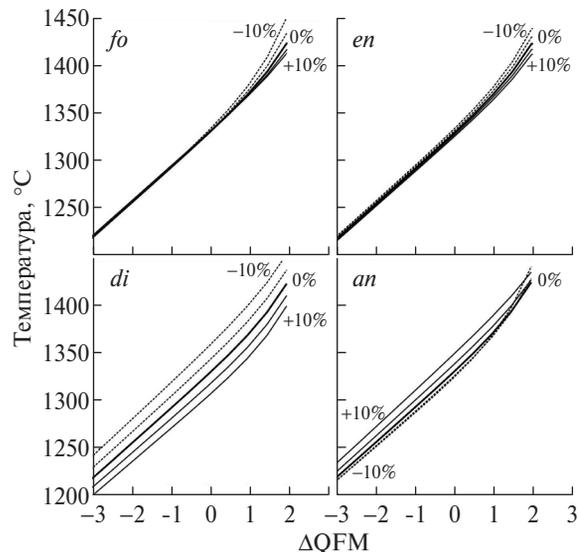


Рис. 1. Влияние вариаций петрогенных компонентов расплава на температуру ликвидуса шпинелида на примере модельного состава B1. Изоплеты проведены через 5 мас.%.

приводит к понижению температуры кристаллизации, практически не влияя на состав шпинелида. Добавление плагиоклазовых миналов (*an*, *ab*) приводит к увеличению температуры, причём вариации *an*-компонента оказывают значимое влияние на состав шпинелида, а вариации *ab* приводят к слабому изменению его состава. В дальнейших рассуждениях мы будем опираться на *di*-, *an*- и *ab*-компоненты как наиболее контрастные.

Механизм образования пластовых хромититов. Важным элементом посткумулясной истории крупных магматических камер является гравитационная усадка (компакция) гетерофазовых толщ, сложенных продуктами аккумуляции кристаллических фаз. Эти процессы должны сопровождаться фильтр-прессингом (отжимом) интеркумулясных расплавов вверх, т.е. его направленной инфильтрацией. Наличие такого подвижного и химически активного агента предполагает последовательное переуравновешивание магматической жидкости с окружающим кумулятивным материалом, что приводит к изменению состава инфильтрата и кумулюсных фаз (процесс, получивший название “магматического метасоматоза” [14]). Даже в изотермических условиях в зависимости от состава кумулата вместе с изменением состава расплава будет меняться растворимость в нём хромшпинелида. Проведённый нами анализ показывает, что в случае обогащения расплава клинопироксеновой составляющей можно ожидать повышения растворимости шпинели, т.е. образования недосыщенных относительно хромшпинелида систем. И наоборот, в случае обогащения расплава

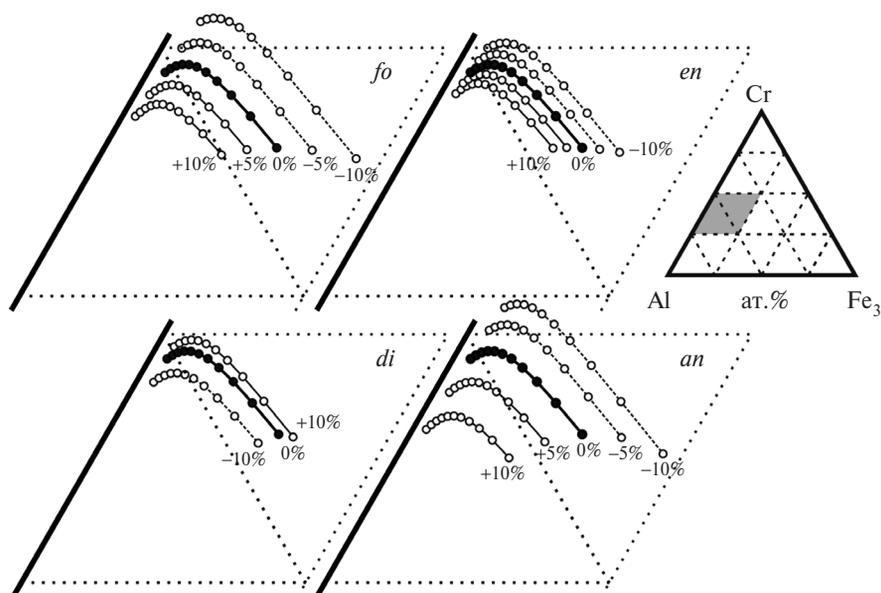


Рис. 2. Влияние вариаций петрогенных компонентов расплава на пропорции трёхвалентных катионов в составе ликвидусного шпинелида на примере состава В1. Крайне левые точки на изоплетах соответствуют QFM-3, крайние правые — QFM+2.

плагноклазовым компонентом должно наблюдаться понижение его растворимости.

Установленные особенности топологии ликвидуса хромшпинелида позволяют предполагать возможность переноса и нового концентрирования этого минерала на посткумулясном этапе затвердевания расслоенных интрузивов. Это реализуется посредством экстракции хромшпинелида в расплав, который обогащён пироксеновым компонентом, из толщ его первичного кумулятивного накопления с содержанием до 5–7%, и последующим его сбросом на геохимическом барьере, при реакции этого расплава с полевошпатовой матрицей протоанортитовых прослоев. За счёт потока инфильтрующегося расплава предложенный механизм может реализовываться в виде последовательности элементарных актов экстракции-сброса хромшпинелида. Причём многократность их повторения может обеспечить накопление значительных объёмов хромитов вне зависимости от степени недосыщенности или пересыщенности расплава хромшпинелидом, которая для каждого отдельного акта может быть незначительной. Эта особенность выгодно отличает предложенный механизм от других гипотез, основанных на однократном изменении растворимости хромита в магматических расплавах. Говорить об универсальности этой генетической схемы преждевременно. Но в пользу её реалистичности свидетельствует пространственная связь хромититовых прослоев с анортозитами, которая хорошо известна в ультрамафит-мафитовых комплексах, в частности

интрузиве о. Рам [6, 7] и горизонтах UG1–UG6 в Бушвельдском комплексе [15].

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант 16–17–00129).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Naldrett A.J., Wilson A., Kinnaird J., Yudovskaya M., Chunnnett G. The Origin of Chromitites and Related PGE Mineralization in the Bushveld Complex: New Mineralogical and Petrological Constraints // *Miner. Deposita*. 2012. V. 47. P. 209–232. DOI: 10.1007/s00126-011-0366-3.
2. Irvine T.N. Origin of Chromitite Layers in the Muskox Intrusion and Other Stratiform Intrusions: A New Interpretation // *Geology*. 1977. V. 5. P. 273–277.
3. Latypov R., Chistyakova S., Mukherjee R. A Novel Hypothesis for Origin of Massive Chromitites in the Bushveld Igneous Complex // *J. Petrol.* 2017. V. 58. Iss. 10. P. 1899–1940. DOI: 10.1093/petrology/egx077.
4. Eales H.V., Costin G. Crustally Contaminated Komatiite: Primary Source of the Chromitites and Marginal, Lower, and Critical Zone Magmas in a Staging Chamber Beneath the Bushveld Complex // *Econ. Geol.* 2012. V. 107. P. 645–665.
5. Boudreau A.E. Modeling the Merensky Reef, Bushveld Complex, Republic of South Africa // *Contribs Mineral. and Petrol.* 2008. V. 156. P. 431–437.
6. O'Driscoll B., Emeleus C.H., Donaldson C.H., Daly J.S. Cr-Spinel Seam Petrogenesis in the Rum Layered Suite, NW Scotland: Cumulate Assimilation and *in situ* Crystallization in a Deforming Crystal Mush // *J.*

- Petrol. 2010. V. 51. Iss. 6. P. 1171–1201. DOI: 10.1093/petrology/egq013.
7. *Leuthold J., Blundy J.D., Brooker R.A.* Experimental Petrology Constraints on the Recycling of Mafic Cumulate: A Focus on Cr-Spinel from the Rum Eastern Layered Intrusion, Scotland // *Contribs Mineral and Petrol.* 2015. V. 170. № 12. DOI: 10.1007/s00410-015-1165-0.
 8. *Mathez E.A., Kinzler R.J.* Metasomatic Chromitite Seams in the Bushveld and Rum Layered Intrusions // *Elements.* 2017. V. 13. № 6. P. 397–402. DOI: 10.2138/gselements.13.6.397.
 9. *Ghiorso M.S., Sack R.O.* Chemical Mass Transfer in Magmatic Process IV. A Revised and Internally Consistent Thermodynamic Model for the Interpolation and Extrapolation of Liquid-Solid Equilibria in Magmatic Systems at Elevated Temperatures and Pressures // *Contribs Mineral. and Petrol.* 1995. V. 119. P. 197–212.
 10. *Wilson A.H.* A Chill Sequence to the Bushveld Complex: Insight into the First Stage of Emplacement and Implications for the Parental Magmas // *J. Petrol.* 2012. V. 53. Iss. 6. P. 1123–1168.
 11. *Николаев Г.С., Арискин А.А., Бармина Г.С.* SPIN-MELT-2.0: Численное моделирование равновесия шпинелид — расплав в базальтовых системах при давлениях до 15 кбар. I. Формулировка, калибровка и тестирование модели // *Геохимия.* 2018. Т. 1. С. 28–49.
 12. *Коржинский Д.С.* Кислотно-основное взаимодействие компонентов в силикатных расплавах и направление котектических линий // *ДАН.* Т. 128. № 2. С. 383–386.
 13. *Николаев Г.С., Арискин А.А., Бармина Г.С.* SPIN-MELT-2.0: Численное моделирование равновесия шпинелид — расплав в базальтовых системах при давлениях до 15 кбар. II. Описание программы, топология модельной системы хромшпинелид—расплав и её петрологические приложения // *Геохимия.* 2018. Т. 2. С. 135–146.
 14. *Irvine T.N.* Infiltration Metasomatism Accumulate Growth and Double-Diffusive Fractional Crystallization in the Muskox Intrusion and Other Layered Intrusions. In: *Hargraves R.B. Physics of Magmatic Processes.* Princeton: Princeton Univ. Press, 1980. P. 325–383.
 15. *Pebane M., Latypov R.* The Significance of Magmatic Erosion for Bifurcation of UG1 Chromitite Layers in the Bushveld Complex // *Ore Geol. Rev.* 2017. V. 90. P. 65–93. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2017.02.026.

NUMERICAL MODELING OF THE EFFECTS OF MAJOR COMPONENTS IN THE MELT ON THE CHROME-SPINEL STABILITY AND A POSSIBLE SOLUTION OF THE ORIGIN CHROMITITES PROBLEM

G. S. Nikolaev¹, A. A. Ariskin^{1,2}, G. S. Barmina¹

¹*Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

²*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

Presented by Academician of the RAS A.V. Sobolev February 5, 2019

Received February 5, 2019

Using a new model of the spinel-melt equilibrium SPINMELT-2.0, the effect of variations of *fo-*, *fa-*, *en-*, *fs-*, *di-*, *an-* and *ab-* components in high-Mg basaltic melts on the topology of the spinel liquidus was quantified. It has been established that enrichment of the melt in pyroxene components leads to an increase, and with plagioclase components, to a decrease in the solubility of chromite. This effect can be important during gravitational compaction of cumulates, accompanied by the extraction of intercumulus melt and its infiltration upward. In this case, one can expect a sequential re-equilibration of the infiltrating melt with cumulative piles of different composition. This suggests the possibility of transfer and new concentration of chrome-spinel at the postcumulus stage of solidification of layered intrusions. The nature of the concentration consists in the extraction of chrome-spinel into the melt enriched in pyroxene components, followed by its discharge during the reaction of this melt with a feldspar-rich matrix of proto-anorthosite layers. The realism of the proposed mechanism is evidenced by the well-known spatial association of chromite layers with anorthosites (intrusion of Ram island, Bushveld complex).

Keywords: chromite-melt equilibrium, geothermometer, chromite liquidus, stratiform chromitite, cumulate, magmatic metasomatism, Bushveld.