

на различные рудные и нерудные эндогенные МПИ коллизионно-складчатых поясов и зон их динамического влияния на активизированные участки платформ. Модель блоковой складчатости не имеет аналогов в мире и принципиально отличается от всех имеющихся в этой области разработок. Впервые складчатость показана не в виде синусоидальных изгибов, а в виде блоков, подвергнутых изгибной тектонике. Кора сохраняет форму плиты, что позволяет ей передавать напряжения сжатия на расстояния.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГГ УрО РАН (№ АААА-А18-118052590028-9).

Литература

Кисин А. Ю., Коротеев В. А. Блоковая складчатость и рудогенез. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2017. 356 с.

Смирнов В. И., Гинзбург А. И., Григорьев В. М., Яковлев Г. Ф. Курс рудных месторождений. Учебник для вузов. М.: Недра, 1981. 348 с.

М. А. Юдовская

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

Хромиты расслоенных интрузивов и проточных магматических каналов как ключ к пониманию процессов рудообразования

Хромит устойчив в широком диапазоне температур и давлений, и его состав используется как индикатор природы материнских расплавов и геодинамических условий становления несущих его интрузивов [Roeder, Reynolds, 1991; Kamenetsky et al., 2001]. В магматических обстановках хромит кристаллизуется как один из первых ликвидусных минералов и/или в составе котектик, при этом часто захватывая комплексные включения сосуществующего расплава. Исходя из раннего зарождения хромита в расплавах, традиционно предполагается, что большинство таких включений были захвачены на ранних стадиях кристаллизации. Хорошо известно, однако, что составы минералов из включений могут значительно отличаться от составов соседствующих кумулюсных и интеркумулюсных минералов, но разнообразие микровключений в хромите принимается чаще как свидетельство изменчивых условий кристаллизации. Некоторые минеральные ассоциации во включениях в хромите, такие как алмаз + коэсит, кристаллизовались при высоком давлении [Yang et al., 2013]. Другие минералы, такие как оливин, Os-Ir-Ru сплавы и сульфиды, могли быть захвачены в промежуточной камере, подводящих каналах и резидентной камере. Водо- и галогенсодержащие силикаты повсеместно присутствуют в составе многофазных включений в хромите из различных геодинамических обстановок, включая океанические и островодужные базальты, офиолиты и расслоенные интрузии. Среди этих

силикатов особенно характерны обогащенные Na амфибол и флогопит, которые могут находиться в сростаниях с плагиоклазом, пироксенами и разнообразными акцессорными минералами, такими как рутил, бадделеит, сульфиды и минералы платиновых металлов. Отрицательная кубическая морфология включений и сходный состав минеральных парагенезисов в них также предполагают, что включения являются раскристаллизованными каплями силикатного расплава, из которого кристаллизовался хромит. Наиболее примитивные по составу включения гомогенизируются в стекле, обогащенное щелочными металлами и несовместимыми элементами с частыми газовыми пузырями и спинифексовым оливином при температурах, достигающих 1400–1450 °C [Spandler et al., 2005; Schiano et al., 1997]. Разнообразные интерпретации предлагались в попытке объяснить парадоксальное обогащение захваченных расплавов несовместимыми элементами и их несоответствие составам предполагаемых родительских расплавов. Среди них были предложены следующие модели: первичная кристаллизация хромита из водонасыщенных расплавов или захват из них несмесимой флюидной фазы [Lorand, Ceuleneer, 1989; Schiano et al., 1997; Matveev, Ballhaus, 2002; Johan et al., 2017], циркуляция позднего метасоматизирующего флюида из подстилающего кумулатного слоя [Li et al., 2005], поздняя пневматолитовая кристаллизация хромита [Distler et al., 2008; Пушкарев и др., 2015], ассимиляция вмещающих пород и гибридизация расплава [Spandler et al., 2005] или ассимиляция субдуцированного слэба [Zhou et al., 2014], взаимодействие со щелочными расплавами [Shaw, Dingwell, 2008], субсолидусный рост хромита [Borisova et al., 2012] и его перекристаллизация, включая доращение его первично дендритовых кристаллов [Vukmanovic et al., 2013].

Возможно, М. Леблан [Leblanc, 1980] был первым, кто предположил, исходя из морфологии включений, что вакуоли и включения в хромите из подиформных хромитов сформировались в процессе частичного растворения и последующего залечивания и доращения хромитовых зерен. Наши наблюдения реакционных текстур хромита из комплекса Бушвелд и норильских интрузивов поддерживают эту модель. Мы провели сравнительные исследования текстур магматических хромитов и ксенокристов хромита из ультраосновных ксенолитов, вынесенных небольшим дайковым телом базальта неогенового возраста на острове Итуруп (Курильские острова). Взаимодействие ксенокристов хромита с недосыщенным по хромиту базальтовым расплавом является природным экспериментом, в котором текстуры растворения и залечивания кристаллов имеют однозначную интерпретацию. Текстурные наблюдения показывают, что включения в ксенокристах хромита из мантийных ксенолитов были захвачены в ходе как первичного роста хромита, так и его последующего химического растворения и вторичного роста. В результате вокруг корродированных реликтов хромита формируется мантия ситовидной или симплектитовой текстуры как результат реакции хромита с расплавом. Присутствующие в хромите «туннели» травления и «дорожки» разнурованных захваченных включений указывают на то, что растворение хромита преимущественно происходило вдоль кристаллографических плоскостей и направлений, которые были богаты дефектами, физическими примесями и, возможно, более ранними включениями. По аналогии с хромитом из природных экспериментов, схожие текстуры хромита из Бушвелда и норильских интрузивов трактуются как реакционные, сформировавшиеся при растворении и перерождении ранних кумулюсных кристаллов при их взаимодействии с остаточными дифференцированными расплавами, недосыщенными по хромиту и обогащенными

несовместимыми элементами. Данные EBSD исследований подтверждают, что все фрагменты хромита реакционной текстуры имеют такую же кристаллографическую ориентацию как их ядерная часть, то есть они растут как монокристалл. Таким образом, сравнивая текстуры ксенокристов хромита и хромита с включениями из магматических комплексов, можно сделать вывод, что ситовидный и атоллоидный хромит может захватывать различные популяции гетерогенных включений в процессах его прерывистого неравновесного роста, включающего эпизоды растворения и регенерации. Появление таких текстур указывает на положение зоны смешения, которое является также благоприятным фактором сульфидного платинометалльного оруденения. Предполагается, что кристаллы хромита приносятся новой магмой, и те из них, которые реагируют с высокоэволюционированным расплавом в верхах магматической колонны в камере, подвергаются травлению с последующим неравновесным ростом. Как правило, хромит внутри массивных хромититов не демонстрирует реакционных текстур, что говорит о доминировании расплава, насыщенного по хромиту, и конечном достижении равновесия между хромитом и жидкостью.

Автор благодарит Г. Костина, И. Чаплыгина, В. Шиловских, Д. Киннэйрда, С. Служеникина, М. МакКриша за сотрудничество. Исследования поддержаны РФФИ (проект № 18-05-70073).

Литература

- Пушкарёв Е. В., Каменецкий В. С., Морозова А. В., Хиллер В. В., Главатских С. П., Родеманн Т. Онтогенез рудных хромшпинелидов и состав включений как индикаторы пневматолито-гидротермального образования платиноносных хромититов массива Кондер (Алданский щит) // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. С. 394–423.
- Borisova A. Y., Ceuleneer G., Kamenetsky V. S., Arai S., Abily B., Bindeman I. N., Polve M., De Parceval P., Aigouy T., Pokrovski G. S. A new view on the petrogenesis of the Oman ophiolite chromitites from microanalyses of chromite-hosted inclusions // Journal of Petrology. 2012. Vol. 53. P. 2411–2440.
- Distler V. V., Kryachko V. V., Yudovskaya M. A. Ore petrology of chromite-PGE mineralization in the Kempirsai ophiolite complex // Mineralogy and Petrology. 2008. Vol. 92. P. 31–58.
- Johan Z., Martin R., 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.
- Kamenetsky V. S., Crawford A. J., Meffre S. Factors controlling chemistry of magmatic spinel: an empirical study of associated olivine, Cr-spinel and melt inclusions from primitive rocks // Journal of Petrology. 2001. Vol. 42. P. 655–671.
- Leblanc M. Chromite growth, dissolution and deformation from a morphological view point: SEM investigations // Mineralium Deposita. 1980. Vol. 15. P. 201–210.
- Li C., Ripley E. M., Sarkar A., Shin D., Maier W. D. Origin of phlogopite-orthopyroxene inclusions in chromites from the Merensky Reef of the Bushveld Complex, South Africa // Contribution to Mineralogy and Petrology. 2005. Vol. 150. P. 119–130.
- Lorand J. P., Ceuleneer G. Silicate and base-metal sulfide inclusions in chromites from the Maqsad area (Oman ophiolite, Gulf of Oman): a model for entrapment // Lithos. 1989. Vol. 22. P. 173–190.
- Matveev S., Ballhaus C. Role of water in the origin of podiform chromitite deposits // Earth and Planetary Science Letters. 2002. Vol. 203. P. 235–243.
- Roeder P. L., Reynolds I. Crystallization of chromite and chromium solubility in basaltic melts // Journal of Petrology. 1991. Vol. 32. P. 909–934.

Schiano P., Clocchiatti R., Lorand J. P., Massare D., Deloule E., Chaussidon M. Primitive basaltic melts included in podiform chromites from the Oman ophiolite // *Earth and Planetary Science Letters*. 1997. Vol. 146. P. 489–497.

Shaw C. S. J., Dingwell D. B. Experimental peridotite–melt reaction at one atmosphere: a textural and chemical study // *Contribution to Mineralogy and Petrology*. 2008. Vol. 155. P. 199–214.

Spandler C., Mavrogenes J., Arculus R. Origin of chromitites in layered intrusions: evidence from chromite-hosted melt inclusions from the Stillwater complex // *Geology*. 2005. Vol. 33. P. 893–896.

Vukmanovic Z., Barnes S. J., Reddy S. M., Godel B., Fiorentini M. L. Morphology and microstructure of chromite crystals in chromitites from the Merensky Reef (Bushveld Complex, South Africa) // *Contribution to Mineralogy and Petrology*. 2013. Vol. 165. P. 1031–1050.

Yang J.-S., Xu X.-Z., Zhang Z.-M., Rong H., Li Y., Xiong F.-H., Liang F.-H., Liu Z., Liu F., Li J.-Y., Li Z.-L., Chen S.-Y., Guo G.-L., Robinson P. T. Ophiolite-type diamond and deep genesis of chromitite // *Acta Geoscientica Sinica*. 2013. Vol. 34. P. 643–653.

Zhou M.-F., Robinson P. T., Su B.-X., Gao J.-F., Li J.-W., Yang J.-S., Malpas J. Compositions of chromite, associated minerals, and parental magmas of podiform chromite deposits: The role of slab contamination of asthenospheric melts in suprasubduction zone environments // *Gondwana Research*. 2014. Vol. 26. P. 262–283.

Е. В. Нечаева¹, В. П. Нечаев², Н. С. Казначеев¹

¹ – Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток
geolog2001@yandex.ru

² – Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток

Внутриплитный магматизм и редкометалльная минерализация районов угленакпления Дальнего Востока России

Редкометалльная минерализация в связи с внутриплитным магматизмом хорошо изучена совместной российско-китайской группой исследователей из ДВФУ и ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток) и Китайского университета горного дела (г. Пекин) в Приморье, на юге Дальнего Востока (ДВ) и в Южном Китае (Эмейшанская крупная изверженная провинция) с участием авторов данной работы [Dai et al., 2016; 2018; Nechaev et al., 2018; Guo et al., 2019]. Основной целью этих исследований было создание генетической модели оруденения.

Кроме вулканических проявлений, рассматриваемая минерализация приурочена к угленосным впадинам кайнозойского (юг ДВ) и пермского (ЮЗ Китай) возраста. Набор элементов, которые она несет в аномально высоких количествах (10 и более раз по отношению к кларкам), обширен. Он включает Ge, Li, Be, Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Zr, Nb, Cd, Sb, Hf, Ta, Re, Th, U, РЗЭ, благородные металлы, а также Hg, As и другие потенциально опасные элементы. Полученные в результате аналитических исследований методами XRF, EAS, ICP-MS, XRD, SEM-EDS изотопно-геохимические и минералогические данные свидетельствуют, что эти элементы:

1) концентрируются в отложениях (преимущественно углях и аргиллизитах) в виде легко растворимых соединений, включая гидрокарбонаты, гидрофосфаты, гидроокислы и сульфиды, а также входят в состав органики и глинистых минералов в сорбированной форме.