

На рисунке 1 видно, что содержания элементов-примесей в молибдените варьируют в зависимости от геотектонических обстановок формирования месторождений. Наиболее высокие содержания Re и низкие – W чаще характерны для месторождений, образовавшихся в обстановках океанических островных дуг, тогда как для месторождений, формировавшихся на активной континентальной окраине (Бенкала) и в коллизионных обстановках (Талицкое) содержания Re понижены, а концентрации W повышены. Это позволяет рассматривать молибденит как один из возможных индикаторов геотектонических обстановок формирования медно- и молибден-порфировых месторождений.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-05-00254).*

### Литература

*Грабежев А.И., Белгородский Е.А.* Продуктивные гранитоиды и метасоматиты медно-порфировых месторождений. Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 1992. 199 с.

*Плотинская О.Ю., Бондарь Д.Б., Абрамова В.Д.* Элементы-примеси в молибдените Cu- и Mo-порфировых месторождений Урала (по данным ЛА ИСП МС): методические подходы и первые результаты // Металлогения древних и современных океанов–2018. Вулканизм и рудообразование. Миасс: ИМин УрО РАН, 2018. С. 115–120.

*Newberry R.J.J.* Polytypism in molybdenite (I): a nonequilibrium impurity induced phenomenon // *American Mineralogist*. 1979. Vol. 64. P. 758–767.

*Plotinskaya O.Y., Abramova V.D., Groznova E.O., Tessalina S.G., Seltmann R., Spratt J.* Trace element geochemistry of molybdenite from porphyry Cu deposits of the Birgilda-Tomino ore cluster (South Urals, Russia) // *Mineralogical Magazine*. 2018. Vol. 82 (S1). P. S281–S306.

*Plotinskaya O.Y., Grabezhev A.I., Tessalina S., Seltmann R., Groznova E.O., Abramov S.S.* Porphyry deposits of the Urals: geological framework and metallogeny // *Ore Geology Reviews*. 2017. Vol. 85. P. 153–173.

*Plotinskaya O.Y., Shilovskikh V.V., Najorka J., Kovalchuk E.V., Seltmann R., Spratt J.* Grain-scale distribution of molybdenite polytypes versus rhenium contents:  $\mu$ XRD and EBSD data // *Mineralogical Magazine*. 2019. Vol. 83. P. 639–644.

**М.А. Юдовская**

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

### **Химические и физические процессы трансформации хромита и его индикаторная роль в расшифровке условий сульфидного магматического рудообразования**

Хромит кристаллизуется из расплавов широкого диапазона составов от коматитовых и пикритовых до толеитовых и щелочных базальтовых. При всех условиях хромит кристаллизуется как один из первых ликвидусных минералов, и его состав, в целом, может быть использован для диагностики состава его родительского расплава. Однако несколько факторов влияют на химический состав хромита и затрудняют прямое сопоставление: (1) изменения самого расплава в ходе кристаллизационной

дифференциации путем осаждения кумулусных минералов; (2) гетерогенность системы, обусловленная проявлениями силикат-сульфид-флюидной несмесимости, смешением или контаминацией, что приводит к локально неравновесной кристаллизации; (3) суперсолидусное химическое переуравновешивание с интерстициальным расплавом часто путем реакций парного растворения-переотложения; (4) субсолидусное переуравновешивание и перераспределение элементов при твердофазных превращениях и под воздействием выделяющейся флюидной фазы.

Настоящая работа рассматривает свидетельства коровой контаминации высокомагнезиальных расплавов, отражающиеся в химическом составе и текстурах хромита, развивая представления [Юдовская, 2019]. Сравнение характеристик хромита из Платрифа в северном лимбе комплекса Бушвельд и хромита из рудоносных интрузивов норильского типа показывает сходство процесса их образования. В расслоенном комплексе Бушвельд две серии шпинелей – хромит и магнетит (до титаномагнетита) – имеют неперекрывающиеся поля составов, и этот разрыв подчеркивается их разделением в разрезе. Хромит кристаллизуется только в породах Нижней и Критической зон, верхняя граница которых проводится по кровле верхней хромитсодержащей пачки. Далее вверх по разрезу следуют породы Главной зоны мощностью 2–3 км, в которых отсутствуют как хромит, так и первичный магнетит. Граница с вышележащей Верхней зоной проводится по первому появлению кумулусного магнетита, который выше по разрезу образует обширные выдержанные слои ванадиеносного титаномагнетита промышленного масштаба. Разобщенность проявления этих двух шпинелей в разрезе подчеркивает правило, что только один состав шпинели находится в равновесии с расплавом и совместная кристаллизация хромита и магнетита невозможны. Тем не менее, в породах Платрифа, который является аналогом Критической зоны в северном лимбе комплекса, эти две шпинели сосуществуют, хотя и не равновесны друг с другом, что отражает гетерогенную кристаллизацию при смешении в различной степени контаминированных расплавов. Составы хромита Платрифа демонстрируют классический бушвельдский тренд дифференциации, выраженный как парное снижение концентраций Cr и Mg в ходе эволюции, а также такой же классический тренд переуравновешивания (*trapped liquid shift*), выраженный в парном увеличении концентраций Ti и трехвалентного Fe за счет парного снижения Al и Mg. Кроме того, обогащение хромита Ti наблюдается в зонах скарирования, приводя к образованию специфических Ti-Fe-Cr шпинелей в ассоциации с ильменитом. Текстуры хромита Платрифа также указывают на его неравновесный посткумулясный рост. Атолловые, симплектитовые, протрузионные, амебовидные и ситовидные зерна формируются в результате реакций растворения-переотложения ранних кумулусных кристаллов при их взаимодействии с контаминированными интерстиционными расплавами, собравшими легкоплавкие компоненты и обогащенными несовместимыми и летучими элементами. Морфология тел вкрапленных хромитов Платрифа отличается невыдержанностью и постепенными переходами во вмещающие породы, контрастируя в этом с пластообразной морфологией выдержанных на протяжении десятков километров и характеризующихся резкими границами массивных хромититов Бушвельда. Это, очевидно, отражает динамические условия внедрения Платрифа во вмещающие осадочные породы как краевого интрузива [Yudovskaya, Kinnaird, 2010].

Сходную морфологию имеют хромитовые сегрегации в верхних частях норильских рудоносных интрузивов [Служеникин и др., 1994]. Хромит здесь большей частью образует вкрапленность в прослоях такситовых габбродолеритов, но также собирается

в слойки, линзы и фрагментированные агрегаты. Состав хромита крайне разнообразен, что, видимо, связано с литологической гетерогенностью Верхней габброидной серии норильских интрузивов [Генкин и др., 1979]. Норильские рудоносные интрузивы также содержат вкрапленность хромита в рудоносном горизонте пикритовых габбро-долеритов Главной расслоенной серии. Составы хромита Главной и Верхней серий во многом перекрываются и характеризуются выраженным трендом дифференциации с обогащением двух- и трехвалентным Fe, а также сосуществованием низко- и высоко-Ti разностей [Генкин и др., 1979; Ryabov et al., 2014]. Составы хромита верхней зоны показывают локальные тренды с парным увеличением содержаний Al и Fe (вплоть до чистого герцинита) и содержаний Cr вплоть до чистого магнезиохромита [Туровцев, 2002], где последний встречен в типично скарновой минеральной ассоциации в пределах интрузивного разреза. Наряду с широкими вариациями состава, свидетельствующими о неравновесных условиях кристаллизации, хромит и хромшпинели демонстрируют разнообразные реакционные структуры локального растворения-переотложения: атоллоидные, протрузионные, симплектитовые и ситовидные. Кроме того, повсеместно развито замещение хромита магнетитом, в различной степени обогащенным Ti и Cr.

Известно, что повышенные содержания воды и высокая фугитивность кислорода способствуют кристаллизации магнетита по сравнению с хромитом и ильменитом [Howarth et al., 2013], и эти факторы, скорее всего, вызвали замещение ранних фенокристов хромита более поздним магнетитом в пределах Верхней серии. Свидетельством присутствия флюида с самых ранних стадий внедрения являются обильные миндалины, сейчас заполненные низкотемпературными минералами, но ранее, видимо, представлявшие собой газовые пузыри, а также своеобразные глобулярные структуры, представляющие собой такие же пузыри, заполненные интерстициальными минералами и окруженные по всей поверхности тонкой пленкой или более мощным слоем кристаллов хромита, герцинита или магнетита размером до 50–70 мкм. Именно «бронирование» пузырей шпинелями позволило их очертаниям сохраниться в раскристаллизованной породе. Такие текстуры были воспроизведены экспериментально [Pleše et al., 2019] и свидетельствуют, скорее всего, об адгезионном налипании (флотировании) хромитовых кристаллов на пузырьках несмесимого флюида, хотя существуют и альтернативные гипотезы.

По аналогии с Платрифом, для которого контаминация расплавов вмещающими осадочными породами не оспаривается, мы предполагаем, что обогащенность норильских расплавов флюидом также связана с ассимиляцией вмещающих пород, богатых летучими компонентами. Химическое растворение и плавление ксенолитов приводили к резкому пересыщению и раннему выделению флюидной фазы в субвулканических резидентных камерах норильских интрузивов.

*Данные получены в сотрудничестве с В.В. Шиловских, Д. Киннэйрд, С.Ф. Служеникиным, М. МакКришем, С. Барнсом, Л. Шоневельд и М. ЛеВаллиан. Исследования поддержаны РФФИ (проект № 18-05-70073).*

## Литература

Генкин Г.Д., Дистлер В.В., Лапутина И.П. Хромитовая минерализация дифференцированных трапповых интрузий и условия ее образования // Условия образования магматических рудных месторождений. М.: Наука, 1979. С. 105–126.

Служеникин С.Ф., Дистлер В.В., Дюжиков О.А. и др. Малосульфидное платиновое ору-  
дование в норильских дифференцированных интрузивах // Геология рудных месторождений.  
1994. Т. 36. С. 195–217.

Туровцев Д.М. Контактный метаморфизм норильских интрузий. М.: Научный мир, 2002.  
319 с.

Юдовская М.А. Хромиты расслоенных интрузивов и проточных магматических каналов  
как ключ к пониманию процессов рудообразования // Металлогения древних и современных  
океанов–2019. Четверть века достижений в изучении субмаринных месторождений. Миасс:  
ИМин УрО РАН, 2019. С. 32–35.

Howarth G.H., Prevec S.A., Zhou M.F. Timing of Ti-magnetite crystallisation and silicate dis-  
equilibrium in the Panzhihua mafic layered intrusion: implications for ore-forming processes // Lithos.  
2013. Vol. 170. P. 73–89.

Pleše P., Higgins M.D., Baker D.R., Lanzafame G., Kudrna Prašek M., Mancini L., Rooyak-  
kers S.M. Production and detachment of oxide crystal shells on bubble walls during experimental  
vesiculation of andesitic magmas // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2019. Vol. 174. P. 21.

Ryabov V.V., Gora M.P., Shevko A.Y. Trap magmatism and ore formation in the Siberian  
Noril'sk region. Springer, 2014. 625 p.

Yudovskaya M.A., Kinnaird J.A. Chromite in the Platreef (Bushveld Complex, South Africa):  
occurrence and evolution of its chemical composition // Mineralium Deposita. 2010. Vol. 45. P. 369–391.

**О.Б. Азовскова, М.Ю. Ровнушкин**

*Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург  
oazovskova@yandex.ru*

### **Органическое вещество в эндогенных процессах (на примере ряда уральских объектов)**

Органическое или углеродистое вещество (ОВ, УВ) – от нефтеподобных про-  
дуктов и битумов до фаз свободного углерода (графит, углистое вещество и т. п.) –  
присутствует в различных геологических образованиях и комплексах. Оно участвует  
в различных, в том числе рудообразующих, процессах, активно влияя на их химизм,  
минералого-геохимические особенности руд и метасоматитов [Банникова, 1990;  
Disnar, Sureau, 1990; Буслаева, Новгородова, 1999; Азовскова и др., 2013]. Это касается  
не только характерных черносланцевых образований, обогащенных УВ пород и угле-  
родистых метасоматитов [Метасоматизм..., 1998; Рапопорт и др., 2001], но и пород и  
метасоматитов, содержащих рассеянное органическое вещество (РОВ), преимуще-  
ственно, битумное, присутствие которого определяется только аналитическими мето-  
дами. В прикладном плане углеродистое (органическое) вещество может выступать  
как один из факторов мобилизации и концентрации рудных компонентов, и в то же  
время как осложняющий фактор при переработке руд.

До недавнего времени УВ в золотоносных «черносланцевых» или «углероди-  
сто-терригенных» комплексах считалось первично осадочным, преобразованном *in situ*  
под воздействием региональных и метасоматических процессов. Однако в последнее  
время появляется все больше данных, подтверждающих значительную роль и флюидо-  
генную природу «наложенной» углеродизации, углеродистого метасоматоза и проявлен-  
ной минерализации РОВ. Это рассматривается как характерный признак воздействия