

РУДООБРАЗОВАНИЕ, МЕТАЛЛОГЕНИЯ, МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ ХРОМИТОВЫХ РУД УРАЛА

А.В. Алексеев

Изучению этого явления посвящено достаточно большое количество литературы [Малахов и др., 2001; Перевозчиков и др., 2003; Evans et al., 1975 и мн. др.], среди которых находятся и наши скромные работы. Исследования хромитовых руд и их метаморфических изменений проводились в течение нескольких лет на трех альпинотипных массивах: Алапаевском, Верблюжьегорском и Верх-Нейвинском. Итоги работ изложены в ряде публикаций [Алексеев и др., 2003; 2005]. Целью настоящей статьи является обобщение данных по высокотемпературному метаморфизму хромшпинелидов.

В ходе работы было установлено, что практически все хромититы трех изученных массивов в той или иной степени подвержены процессам метаморфизма, хорошо диагностирующимся при микроскопических исследованиях. Несмотря на положение хромитовых руд в разных структурах изученных массивов, их принадлежность к различным петрографическим разностям пород, наконец, разным причинам метаморфизма, выделяется два типа преобразований хромитовых руд, каждый из которых обладает своими, строго ограниченными характерными особенностями. Эти процессы наиболее наглядно замечены на основе изучения отдельных зерен хромшпинелидов – в них от центра к краю прослеживается весь ряд привноса-выноса элементов. Первый тип метаморфизма характеризуется накоплением Cr^{3+} и Fe^{2+} вплоть до формирования минерала, по химическому составу отвечающему чистому хромиту (высокотемпературный метаморфизм), второй – накоплением Fe^{3+} и Fe^{2+} до образования магнетита (низкотемпературный метаморфизм). Каждый из этих процессов характеризуется своими интервалами температур и давлений, а различия в характере метаморфизма обусловлены изменениями активности Al и Fe с изменением температуры. Согласно данным

изучения декрипитации руд, точка инверсии приходится на 420–450°C – выше нее Al более подвижен, чем Fe, ниже – наоборот [Алексеев и др., 2005].

Приведем подробную характеристику высокотемпературного метаморфизма.

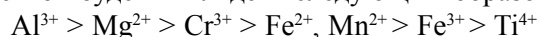
Высокотемпературный метаморфизм хромшпинелидов

Высокотемпературный метаморфизм хромитовых руд является процессом, проходящим при определенных физико-химических условиях среды и проявляющимся в закономерном изменении химического и минерального состава руд и их структурно-текстурного рисунка. Эти явления проявляются в следующем:

I. Закономерное изменение состава.

Для всех изученных массивов, вне зависимости от первоначального состава хромитовых руд и причин, вызвавших метаморфические изменения, изменение состава происходит по одному и тому же принципу. Происходит удаление из кристаллической решетки хромшпинелида Al^{3+} и Mg^{2+} и накопление в остатке, соответственно, Cr^{3+} и Fe^{2+} . Расчетное содержание Fe^{3+} остается фактически неизменным, Ti^{4+} – снижается, Mn^{2+} – повышается. Редкие и акцессорные элементы полностью удаляются из кристаллической решетки хромшпинелида уже на первых стадиях метаморфизма. При метаморфизме пределом эволюции состава первичного хромшпинелида будет чистый хромит FeCr_2O_4 (необходимое уточнение: хромиту он будет отвечать только по химическому составу, но кристаллическая решетка будет сильно деформирована).

Соответственно, ряд подвижности элементов будет выглядеть следующим образом:



Оговорим еще одно условие: отображать

состав и вычислять формулу метаморфизованного хромшпинелида по диаграмме Павлова не совсем корректно, так как при метаморфизме идет нарушение кристаллической решетки минерала (вплоть до полного ее разрушения) и изменение соотношения Fe^{2+} и Fe^{3+} . Однако использование этой диаграммы наиболее удобно по сравнению с другими вариантами отображения – в особенности наглядно прослеживается изменение состава хромшпинелидов.

II. Появление новой минеральной фазы. Вынесенные из хромшпинелидов компоненты образуют собственные минеральные фазы, из которых главной (наиболее распространенной) является хлорит. Помимо петрографических наблюдений минералогические различия силикатов в первичных и метаморфизованных хромитовых рудах установлены с помощью рентгено-структурного анализа. В первых в качестве нерудной фазы преобладает оливин и развивающийся по нему серпентин, во вторых главную роль играет хлорит. Размер и харак-

тер обособлений хлорита зависит от степени метаморфизма и наличия в хромшпинелидах первичной отдельности.

Помимо хлорита, за счет удаленных из хромшпинелида аксессуарных элементов образуется вкрапленность новообразованных минералов, в первую очередь сульфидов (пирит, миллерит, халькопирит, хизлеудит), несколько реже – оксидов (рутил, реддледжит) и самородных металлов (золото, серебро). Зачастую эти минералы удобно использовать в качестве диагностических признаков условий метаморфизма и причин, вызвавших его. Остается не совсем понятным поведение титана. Практически во всех наших образцах отмечается его вынос из хромшпинелида при метаморфизме с образованием собственных минералов. Однако в литературных данных отмечается и обратный процесс – обогащение хроммагнетита титаном.

III. Изменение структурно-текстурного рисунка. Метаморфические преобразования хромитовых руд характеризуются изме-

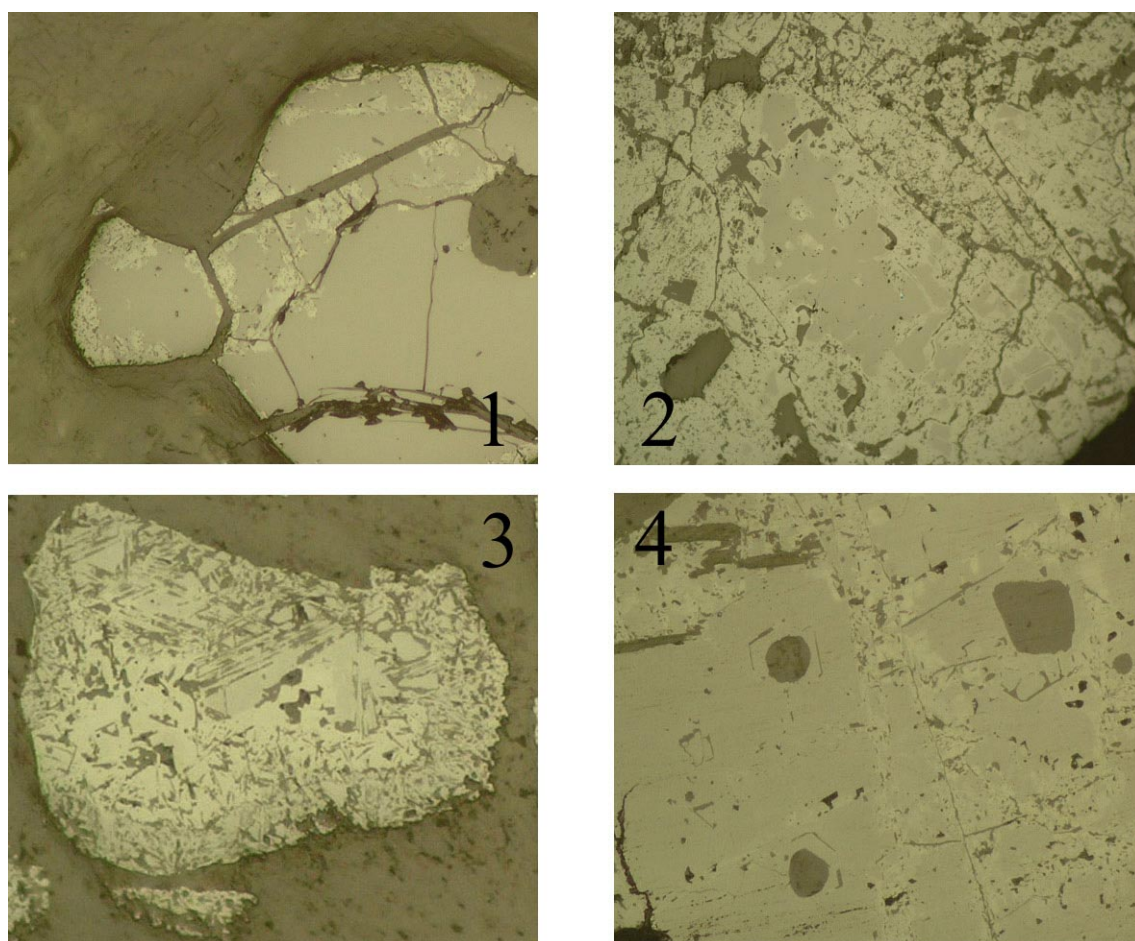


Рис. 1. Структуры хромшпинелидов на разных стадиях метаморфизма руд.

1 – образование реакционных кайм; 2 – разрастание кайм; 3 – полное замещение; 4 – перекристаллизация хромшпинелидов.

нением структурно-текстурного рисунка как отдельных зерен хромшпинелидов, так и руд в целом. По виду и характеру изменений оказалось удобным разделить весь процесс на несколько хорошо диагностируемых стадий, для каждой из которых свойственны свои характерные черты и особенности.

1. Стадия образования реакционных кайм. Эта стадия метаморфизма наблюдается на большей части месторождений хромитовых руд, так как для ее прохождения достаточно даже небольшого воздействия метаморфизирующих агентов (рис. 1, а). Проявляется в виде изменения состава периферических участков хромшпинелидов (краевых зон, трещин отдельности и деформации).

2. Стадия разрастания кайм. Дальнейшее развитие метаморфических преобразований хромшпинелидов приводит к разрастанию кайм, неизменными остаются только реликтовые центральные зоны зерен. Основное отличие этой стадии – тенденция к укрупнению агрегатов хлорита с образованием либо дендритовидных вростков по трещинам отдельности в хромшпинелиде, либо изометричных обособлений. В отдельных случаях образуются «пористые» структуры хромшпинелидов в результате перекристаллизации и разрастания хлоритовых агрегатов. Реликты хромшпинелидов, несмотря на высокую степень изменений, фактически не меняют свой изначальный состав (за исключением примесных элементов), являясь индикаторами первоначального типа руд. Состав измененных хромшпинелидов постепенно приближается к чистому хромиту (рис. 1, б).

3. Стадия полного замещения. Образование на месте хромшпинелида тесного прорастания более высокохромистого хромита и хлорита приводит к образованию типичных скелетных структур, состоящих из дендритовидного хромшпинелидового каркаса, заключающего в себе разноразмерные обособления хлорита. При этом достаточно часто наблюдаются прямолинейные границы раздела хромит-хлорит вплоть до псевдоидiomорфных очертаний последнего. В отдельных случаях наблюдается затушевывание первичных структур хромитовых руд в процессе метаморфизма, что связано с изменением объема руд при распаде и проявляющемся вследствие этого течении вещества. Состав хромшпинелида на заключительных стадиях выравнивается по всей площади зерна и наиболее полно отвечает идеаль-

ному хромиту (рис. 1, в).

4. Стадия перекристаллизации. Хромшпинелиды характеризуются крайне низкой термодинамической прочностью и способны к спонтанной перекристаллизации на любой стадии существования руд. На начальном этапе это проявляется в появлении многочисленных идиоморфных зародышей – центров рекристаллизации как в реликтах хромшпинелида, так и в хлоритовой матрице (рис. 1, г). Новобразования однородны по структуре, избавлены от включений хлорита, и, что важно, обычно отличаются по составу от зерна хромшпинелида-хозяина. При разрастании новообразований хлорит оттесняется на периферию, образуя специфические хлоритовые каймы, являющиеся четким индикатором прошедшего метаморфизма. Восстановление при перекристаллизации первоначальных форм хромшпинелидов нередко затрудняет определение исходного типа руд, поэтому многие метаморфизованные руды отнесены к первичным.

IV. Параметры решетки хромшпинелидов по данным рентгено-структурного анализа. Параметры решетки хромшпинелида при метаморфизме закономерно возрастают, что было показано С.А. Кашиным на примере Верблюжьегогорских руд [Хромиты, 1937], а в последнее время подтверждено О.А. Толкановым и др. на примере руд большинства уральских массивов [Чернобровкин и др., 2004]. Это явление связано с возрастанием в хромшпинелиде доли магнетитового минала.

Не менее интересным и информативным оказывается сравнительный анализ параметров ячейки хромшпинелида, измеренной с помощью рентгеноструктурного анализа и рассчитанной по химическому составу руд. Для первичных, неизмененных руд эти данные существенно расходятся, что объясняется влиянием многочисленных примесей, создающих дефекты решетки и искажающих ее в сторону увеличения. По мере нарастания степени метаморфизма идет очищение решетки хромшпинелида от примесных элементов и уравнивание расчетных и измеренных значений. Отметим, что при перекристаллизации руд рассчитанные и измеренные параметры ячейки также близки, что хорошо видно на примере хромитов Верх-Нейвинского массива.

Таким образом, можно с уверенностью утверждать, что метаморфизм хромитов ведет к очищению их от всех элементов-примесей.

Коэффициенты корреляции между основными расчетными параметрами в хромшпинелидах

Массив	Тип руд	$f-Y$	$f-Z$	$Y-Z$	$r_{\text{крит.}}$	Кол-во анализов
Первичные хромшпинелиды						
Кемпирсайский	глиноземистые	0,42	-0,08	0,13	0,48	30
	хромистые	0,07	0,16	0,15	0,48	30
Халиловский	хромистые	-0,15	-0,19	0,18	0,35	49
Алапаевский	глиноземистые	0,13	-0,15	0,23	0,65	20
	хромистые	-0,03	-0,34	0,16	0,57	28
Метаморфизованные хромшпинелиды						
Алапаевский – руды гарцбургитового комплекса	хромистые	0,66	0,23	0,36	0,60	25
Верх-Нейвинский	хромистые	0,90	0,45	0,58	0,40	37
Верблюжьегорский	хромистые	0,74	0,48	0,47	0,45	33

Примечание: выделены значимые коэффициенты корреляции ($\alpha=0,05$).

V. Железистость хромшпинелидов как показатель степени метаморфизма.

Проводимый при обработке анализов хромшпинелидов расчет их основных параметров, к которым относятся: железистость f , суммарная железистость f' , хромистость Y и доля трехвалентного железа Z , позволяет проанализировать и разделить исследуемые выборки на группы, отличающиеся друг от друга по составу и дать их интерпретацию. Для этих целей широко используется диаграмма Т.Н. Ирвайна. В нашем случае проведена лишь замена показателя f на f' , что, как показали эмпирические данные, облегчает анализ. Анализ корреляционных связей среди расчетных параметров в выборках первичных руд (как по дунитам, так и по гарцбургитам) показало их полное отсутствие (табл. 1).

Метаморфические преобразования руд всегда сопровождаются ростом железистости хромшпинелидов, возрастающей тем больше, чем интенсивнее проявлены преобразования. Все изученные объекты в той или иной степени подвергались метаморфизму, что подтверждает проведенный анализ состава руд. Однако, если последний показывает лишь наличие и, отчасти, интенсивность метаморфизма, то анализ параметров позволяет определить направленность процесса. Учитывая вышеприведенные данные по определению температур метаморфизма, на диаграммах можно выделить три направления эволюции состава хромшпинелидов:

- рост f' и Y при стабильном Z – наиболее высокотемпературный процесс, отражающий стремление хромшпинелида приблизиться

по составу к идеальному хромиту; соответственно, появляется корреляция между f' и Y ;

- синхронный рост всех трех компонентов – среднетемпературный процесс, отражающий появление магнетитового минала; корреляционные связи появляются для всех компонентов;

- рост f' и Z при понижении Y – низкотемпературное замещение магнетитом на наших объектах проявлено очень слабо, не удается даже «поймать» корреляционные связи параметров, хотя можно утверждать, что они должны присутствовать.

Анализ расчетных параметров показывает наличие нескольких процессов метаморфических изменений хромшпинелидов. Причем, проходят они однонаправленно, вне зависимости от первичного состава руд.

VI. Определение температур формирования хлорита на основе хлоритового геотермометра. Для установления температуры протекания высокотемпературного метаморфизма использован хлоритовый термометр [Cathelineau, 1988]. Для исследований отобраны несколько проб, результаты по которым приведены в табл. 2.

Как видно из полученных данных, наиболее высокие значения температур получены для хлоритов из кайм вокруг нодулярных руд (Халиловский массив). Причем это отражает процесс перекристаллизации хромшпинелидов и их очищения, а реальные температуры метаморфизма были выше, на что указывают данные декрипитации – на уровне 750-800°C. Практически та же картина наблюдается для образ-

Определение температур формирования хлоритов из метаморфизованных руд

№ обр	Массив, месторождение	Тип хлорита	$d_{0,01}$	Al^{IV}	$T^{\circ}C$
135/1	Халиловский, № 90	клинохлор	14,2	1,8	520
б/н	Рай-Изский, Центральное	кеммерерит	14,24	1,7	490
А-26	Алапаевский, III Поденный	кочубеит	14,27	1,5	420
Вер-38	Верблюжьегорский, № 26	клинохлор	14,26	1,5	420
Вер-33	Верблюжьегорский, Новое тело	кеммерерит	14,36	0,84	210
Вер-40	Верблюжьегорский, № 26	кочубеит	14,24	1,55	440

ца средневкрапленных руд с Рай-Изского массива, в котором хлорит (кеммерерит) выполняет роль цемента для зерен хромшпинелида. Хотя у нас нет данных по хлоритам Верх-Нейвинского массива, для него можно предположить те же условия метаморфизма. Подобным образом можно предполагать максимальную температуру начала метаморфизма на уровне 750-800°C. Очевидно, именно этим объясняется новообразованная форма хромшпинелидов и оттеснение хлорита в каймы: у руд был «запас» времени для перекристаллизации.

Для сильнометаморфизованных первично глиноземистых руд Верблюжьегорского и Алапаевского массивов температура протекания метаморфизма несколько ниже – на уровне 420°C. Данные декрипитации подтверждают, что основной процесс происходил в этом диапазоне температур, но начало протекания процесса фиксируется несколько выше – на уровне 650-700°C. Более низкие температуры объясняются слабым термальным воздействием габброидов, что хорошо прослеживается на примере развития дунит-верлит-клинопироксенитового комплекса: на Верх-Нейвинском массиве он развит наиболее интенсивно, соответственно и расчетные температуры начала метаморфизма наиболее высоки. Напротив, для Алапаевского наблюдается крайне слабое проявление ДВК комплекса, и, соответственно, более слабые изменения хромитов. Таким образом, можно диагностировать нижнюю границу развития высокотемпературного метаморфизма на уровне температур 400-420°C.

Вместе с тем, отмечается крайне низкая температура формирования хлорита из скелетных руд Нового тела в Верблюжьегорском массиве. Однако, с помощью данных рентгеноструктурного анализа однозначно установлено развитие в нем двух видов хромшпинелида – высокохромистого, близкого к чистому хромиту, и высокожелезистого, близкого к магне-

титу. Таким образом, в данном случае мы фиксируем наложение процесса низкотемпературного метаморфизма на высокотемпературный, что хорошо коррелирует с данными микроструктурных анализов хромшпинелидов.

VII. Зональность рудных тел по составу хромшпинелидов. При изучении хромитовых руд была отмечена их неоднородность по степени метаморфизма хромшпинелидов. Проведенные исследования изложены в статье [Алексеев, 2006] и сводятся к следующему:

1. Метаморфические преобразования проходят за счет флюидов, проникающих в ослабленные зоны (разломы и контакты рудных тел). Глубина проникновения флюидов сравнительно невелика. Она составляет первые десятки см и может достигать – 1-2 м.

2. Висячий бок всегда подвержен большему метаморфизму, чем лежащий, что обусловлено двумя причинами – преимущественно вкрапленной структурой руд висячего бока и движением флюидов от подводящего канала вверх по телу.

VIII. Факторы метаморфизма хромитовых руд. Охарактеризовав высокотемпературные метаморфические изменения хромшпинелидов и указав их специфические особенности, можно сделать выводы о двух причинах, обусловивших изменения. Разумеется, они выделены только на основании данных по изученным объектам, вполне вероятно, что на других массивах найдутся иные источники метаморфизирующих агентов.

1. Воздействие молодых габброидов. Интрузии более молодых пород основного состава практически всегда сопровождают ультраосновными интрузиями и оказывают неизбежное контактное воздействие на последние с образованием дунит-верлит-клинопироксенитового (ДВК) комплекса. Степень его развития напрямую зависит от мощности габброидов и от характера их контакта с ультраосновными

породами. Не меньшее значение имеет тектоника: ослабленные зоны служат проводниками флюидных агентов с последующим развитием по ним ДВК комплекса даже на значительном удалении от габброидов.

В свою очередь, степень метаморфизма руд и интенсивность развития ДВК комплекса напрямую связаны. Так, максимальное изменение хромшпинелидов в хромитовых рудах наблюдается для месторождений Верх-Нейвинского массива. Также интенсивное воздействие претерпели месторождения Алапаевского массива, находящиеся в контактовой части с Александровским массивом габброидов. По мере удаления от габброидов в обоих случаях степень проявления процессов метаморфизма, и, что немаловажно, температуры изменений, понижаются.

Важные особенности-индикаторы процесса метаморфизма под воздействием габброидов: нахождение (или взаимосвязь) в поле развития ДВК комплекса, повышение в хромшпинелидах содержания титана вплоть до 1 %, повышенное количество новообразованных сульфидных минералов, концентрирующихся в интерстициях и метаморфизованных участках зерен.

2. «Таинственная» причина. Для месторождений Центрального рудного поля Верблюжьегогорского массива и Сусанского месторождения Алапаевского массива нами отмечена крайне высокая степень высокотемпературных метаморфических изменений хромитовых руд. В обоих случаях отмечается схожая геологическая позиция месторождений – приуроченность к низам (?) гарцбургитового комплекса, сильная антигоритизация пород, приуроченность рудных тел к зонам разрывных нарушений. Отмечается большое количество новообразованных титановых минералов – рутила, гейкелита, перовскита и редлджеита. И, наконец, не отмечается (в т. ч. и по геофизическим данным) каких-либо поздних интрузий, способных вызвать метаморфизм. Указанные выше особенности позволяют выделить эти объекты в отдельную группу. Но указать причину столь высокой степени метаморфизма руд на настоящий момент не представляется возможным.

Исследования выполнены при поддержке Фонда содействия отечественной науке.

Список литературы

Алексеев А.В., Малахов И.А., Бурмако П.Л. Метаморфизм хромитовых руд Верблюжьегогорского массива (Южный Урал) // Эволюция внутриконтинентальных подвижных поясов. Мат-лы междунар. науч. конф. «IX чтения А.Н. Заварицкого». ИГГ УрО РАН. Екатеринбург, 2003. С. 153-156.

Алексеев А.В. Условия формирования и состав хромитовых руд Алапаевского, Верх-Нейвинского и Верблюжьегогорского альпинотипных ультраосновных массивов Урала. Автореф. ... канд. геол.-мин. наук. Екатеринбург, 2005. 24 с.

Алексеев А.В. Зональность рудных тел по составу хромшпинелидов // 8-е Чтения им. Чирвинского. Пермь. 2006.

Бетехтин А.Г., Кашин С.А. Хромиты СССР. Изд-во АН СССР. Т.1, 1937. 388 с. Т.2, 1940. 339 с.

Малахов И.А., Савохин И.В., Бурмако П.Л. и др. Влияние процессов метаморфизма и метасоматоза на состав хромшпинелидов в ультрамафитах и хромитах Урала // Изв. УГГ-ГА. Серия: Геология и геофизика. Вып. 13. 2001. С. 66-73.

Перевозчиков Б.В., Сибчихин О.В. Среднетемпературный метаморфизм хромитовых руд глиноземистого магнезиального типа (на примере Войкаро-Сыньинского массива на Полярном Урале) // Проблем минералогии, петрографии и металлогении. Вып. 5., Пермь. 2003. С. 170-180.

Чернобровкин В.П., Пашкеев И.Ю., Михайлов Г.Г. и др. Теоретические основы процессов производства углеродистого феррохрома из уральских руд. Челябинск: Изд-во ЮурГУ, 2004. 346 с.

Cathelineau M. Cation site occupansy in chlorites and illites as a function of temperature // Clay Minerals. 1988. P. 471-485.

Evans B.W., Frost B.R. Chrome-spinel in progressive metamorphism – a preliminary analysis // Geohim. et cosmochim. Acta, 1975. V. 39 № 6/7. P. 959-972.