

МИКРОСТРУКТУРА МАГНЕТИТОВ КАК ИНДИКАТОР СПЕЦИФИКИ РУДНО-МАГМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ТРАППОВ ПРИЕНИСЕЙСКОГО РАЙОНА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

М.П. Мазуров^{1,2}, А.В. Шихова¹, А.Т. Титов^{1,2}, Ю.Р. Васильев¹

*1 – Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т. Коптюга, 3,
Россия;*

2 – Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, д. 2, Россия

Методом сканирующей электронной микроскопии и электронным зондированием исследованы магнетиты из контактов высокомагнезиальных терригенно-карбонатных отложений и траппового комплекса Сибирской платформы. Они закономерно изменяют свой состав и микроструктуру в разных парагенетических ассоциациях, отражая специфику разных стадий минералообразования в отличающихся по составу замещаемых породах. Внутри долеритовых тел содержатся акцессорные титаномагнетиты, а в преобразованных породах экзоконтактов присутствуют неоднородные магнетиты, состав которых отвечает системе $Fe_2O_4 - MgAl_2O_4 - MgFe_2O_4 - FeAl_2O_4$. Магнетиты зональные. Высокомагнезиальные магнетиты, обычно отмечаемые в литературе как магномагнетиты, представляют собой сложные твердые растворы магнетита, магнезиоферрита, алюмошпинели и герцинита. При подсолвусном распаде сначала возникают высокоглиноземистые магний – железистые изометричные частицы до 5 микрон в поперечнике, включающие примесь марганца и цинка, а затем пластинчатые герцинит-шпинелевые частицы длиной в первые микроны и шириной в десятки раз меньше, а затем точечные выделения. Оставшиеся после этого участки можно интерпретировать как магнетит-магнезиоферритовый твердый раствор или «магномагнетит». При гидротермальных преобразованиях эксоллюционные шпинели замещаются хлоритом и другими минералами, а изоморфные примеси магния сохраняются. Причиной высокой магнезиальности магнетитов, обогащения магнезиоферритовой составляющей, являются сочетание высокой температуры, магнезиального состава замещаемых пород и высокой активности кислорода в субвулканической фации.

магнетиты, твердые растворы алюмо- и ферришпинелей, траппы

MICROTEXTURE OF MAGNETITES AS INDICATOR THE SPECIFICITY ORE- MAGMATIC TRAPPS SYSTEMS IN ADJASANT TO ENISSEY PART OF SIBERIAN PLATFORM

M.P. Mazurov, A.V. Shikhova, A.T. Titov, Yu.R. Vasiliev

Methods of scanning electron microscopy and electron microprobing were used to study magnetites from contacts high magnesium carbonaceous terrigenous rocks with trapp complex of Siberian Platform. The chemical composition and microtexture of ore minerals are correlated with the petrochemical types of rocks and physical-chemical conditions of metasomatic processes. Exsolution structures are very revealing for titanium and iron oxides and dependent on the oxidation condition and on the assemblage of impurities and their quantities. Accessory titanomagnetites are the main opacity minerals in dolerites. Magnetite in metasomatic rocks – the solid solution of $Fe_2O_4 - MgAl_2O_4 - MgFe_2O_4 - FeAl_2O_4$. They are zoning. Mg-high magnetite (magmomagnetite) is complex solid solution of magnetite, magnesioferrite, spinel and hercynite. The first exsolution phases are isometric particles of spinel (Mg, Al, Fe with impurities Mn, Zn).

They are 5 micron in diameter. The second generation of exsolution hercynite-spinel particles is 5 mkm in lengths and 0,2 mkm in width. The following lamellas are less than previous. These sites are fine magnetite-magnesioferrite mixture – «magnomagnetite. During hydrothermal stages, exsolution particles are substitute for chlorite and other minerals. Isomorphic impurity of Mg is preserved. Combinations of high temperature, magnesium in replaceable rocks, oxygen activity are the reason of magnomagnetite origin in subvolcanic facies.

magnetite, spinel, solid solution, trapp

ВВЕДЕНИЕ

Простые и сложные оксиды железа известны во всех типах пород, вмещающих рудные залежи: в осадочных, метаморфических, магматических, метасоматических и гидротермальных. Они устойчивы в широком интервале физико-химических условий и в разных по составу средах, закономерно изменяют свою структуру и состав в разных парагенезисах, т.е. являются сквозными минералами. Обладая большим разнообразием химического состава и кристаллической структуры в разных минералообразующих системах, они могут служить индикаторами генетических процессов. Несмотря на многолетние исследования, часть вопросов минералогии и петрологии месторождений, связанных с траппами Сибирской платформы (СП), остается слабо разработанной. По нашему мнению, в большей степени это касается анализа минеральных парагенетических ассоциаций руд и пород, изучения микроструктуры рудных минералов, обоснования отличий рудных и породных генераций минералов. Это затрудняет применение минералого-геохимических данных для оценки генезиса и перспектив новых рудопроявлений. В последние десятилетия в процессе поисково-разведочного бурения на углеводородное сырье в центральной части СП сделаны новые находки рудной минерализации. Для оценки их генезиса и перспектив требуется определение рудно-формационной принадлежности, уточнение особенностей развития рудно-магматических систем в конкретной структурно-тектонической обстановке.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Дискуссионность представлений о генезисе рудных ассоциаций и развитии минералообразующих систем трапповой формации СП в целом, предопределили необходимость обобщения известных данных и их дополнительного изучения с применением новейших методов. Главной особенностью нашей работы является применение методов сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии. Впервые для исследования строения реакционных зон, границ, микроструктуры и механизмов кристаллизации минералов нами используются уникальные возможности сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения серии MIRA LM, оснащенного электронной пушкой с полевой эмиссией. Преимуществом прибора является непрерывная регулировка изображения от 4x до 1000000x, удобные параметры сканирования и получения распределения микро и наночастиц. Благодаря набору детекторов имеется возможность проведения количественного анализа тонких минеральных сростаний и включений. Это дает информацию для выделения состава и микроструктуры сингенетической рудной, в том числе благороднометалльной минерализации, путей ее трансформации на разных стадиях

магматического и послемагматического этапов, а также возможность получить дополнительное обоснование для разделения магматических и гидротермально-метасоматических генераций руд.

ГЕОЛОГИЯ И МЕТАЛЛОГЕНИЯ РАЙОНА

Цель данной статьи – показать результаты исследования магнетитов из проявлений Приенисейской части СП. Как известно, в металлогеническом отношении наибольшее значение на СП имеют значение магматические месторождения медно-никелевых руд на севере СП и скарново-магнетитовых руд на юге. Наряду с работами по расширению рудной базы этих районов, особый интерес привлекает междуречье Подкаменной и Нижней Тунгусок. Еще в 30-е годы прошлого столетия на преобладание здесь интрузивных траппов с широкими ореолами метасоматических пород и многообразием рудной минерализации обратил внимание В.С. Соболев [15]. Ф.Н. Шахов первым дал детальную характеристику оригинальных проявлений магнезиоферрита [16], сопоставив их с месторождениями ангаро-илимского типа. В дальнейшем были выявлены многочисленные мелкие месторождения и рудопроявления магнетита в нижнем течении рек Подкаменная Тунгуска и Бахта [6, 14]. Проводя исследование петрологии траппов, была выделена самостоятельная Среднеенисейская провинция магнезиальных базитов, перспективных на медно-никелевую рудоносность [3, 4]. В ее пределах А.П. Бронниковым были обнаружены и изучены нами проявления массивных сульфидных руд норильского типа [1]. По материалам, полученным в результате изучения керна скважин нефтепоискового бурения, определены условия кристаллизации оксидных и сульфидных руд, ассоциации и строение рудных минералов в интрузивных траппах западной части (СП) [12]. Новые данные о рудообразующих процессах и о специфике формирования магнетитов в контактах долеритов с каменными солями и карбонатно-соленосными отложениями получены нами на месторождениях южной части СП [9–12]. Эти оригинальные материалы помогли при интерпретации особенностей строения и условий кристаллизации магнетита и в этом новом рудном районе.

В тектоническом отношении юго-западные районы СП представляет собой часть области сочленения структур Западно-Сибирской и Восточно-Сибирской плит. Это сложный каркас блоков палеозойских пород чехла СП, разграниченных разрывными нарушениями разных порядков. Внутри блоков осадочные толщи подвержены пликативным и инъективным дислокациями, неравномерно насыщены интрузивными телами траппов, которые встречаются на всех уровнях платформенного чехла, от нижнего кембрия до триаса. Морфология и размер интрузивов изменяются в широком диапазоне. Преобладают пластовые интрузивы переменной мощности – от первых метров до первых сотен метров. Встречаются разнообразные секущие дуговые, радиальные, кольцевые и ступенчатые тела. Совокупность взаимосвязанных тел разного внутреннего строения, в том числе имеющих скрытую расслоенность, выделяется как онекский комплекс [2]. В интрузивных траппах рассматриваемого района имеется все структурно-морфологическое разнообразие оксидов железа и титана, а также позднемагматических и гидротермальных сульфидов, свойственных интрузивным комплексам норильско-талнахского рудного района СП [13]. Железорудные

месторождения и рудопроявления, экономическая значимость которых остается недостаточно оцененной, представлены всем разнообразием формационных и минеральных типов, свойственных южным районам СП. Магматические рудопроявления титаномагнетита локализованы внутри интрузивных тел. Мелкие тела вкрапленных и прожилковых известковоскарновых магнетитовых руд приурочены к эндоконтактам силлов и к трещинным зонам за их пределами, подчиняясь структурному и литологическому контролю.

МИКРОСТРУКТУРА И СОСТАВ МАГНЕТИТОВ

Основное наше внимание было сосредоточено на изучении микроструктуры и состава магнетитов в образцах руд, отобранных в сопряженных с долеритами метасоматически измененных карбонатных породах Борского рудопроявления в приустьевой части Подкаменной Тунгуски. По текстурам и минеральному составу они аналогичны рудам послонных залежей, оперяющих на Коршуновском и Рудногорском месторождениях основную рудоносную вулканотектоническую структуру [7]. Характерный образец представляет собой пятнисто-вкрапленную мелкозернистую магнетитовую руду. Нерудные минералы – это низкожелезистый биотит (флогопит), диопсид, апатит, титанит, хлорит, кальцит, в целом отвечающим парагенезису гидратированных магнезиальных скарнов. Под микроскопом хорошо видна полигонально зернистая структура, ровные линейные границы зерен, что свидетельствует о структурной упорядоченности рудного агрегата при понижении температуры. Весьма показательно сочетание узора зональности и размещения микроблоков, вызванных ступенчатым распадом твердого раствора первичных зерен магнетита, содержащих многочисленные структурные примеси. На рисунке 1 приведен характерный пример этой микроструктуры, насколько нам известно, ранее не отмеченной в литературе.

Центральная округлая часть зерна около 150 микрон в поперечнике сложена вкрапленностью изометричных частиц шпинели с единичными ее игольчатыми выделениями. Дальше она сменяется пятнистыми участками с более мелкими изометричными частицами шпинели и прерывистыми участками удлиненных частиц, ориентированных по граням ромбододекаэдра. После относительно однородной зоны шириной около 10 микрон четко прорисовывается пояс, фиксирующий изометричные частицы по граням ромбододекаэдра. Следующие за ним зоны, насыщенные тонкими микровыделениями примесных частиц разной плотности, сменяются широкой светлой внешней каймой с точечными микрочастицами. Размер выделений примесных частиц настолько мелкий, что даже при больших увеличениях невозможно точно определить их состав, тем более что в силу диффузионного механизма их формирования как продуктов распада твердого раствора, он переменный. При сканировании фрагментов близких по узору участков в магнетитовой матрице (см. рис. 1) выясняется, что центральная часть этого смешанного кристалла содержит повышенное количество всех примесей (анализ 2, табл. 1) которые при пересчете на кристаллохимическую формулу могут быть объединены в магнезиоферритовый, алюмошпинелевый, ульвошпинелевый, якобитовый минералы. В кайме зерна (фрагменты 1 и 2) примеси марганца нет, меньше магния и алюминия. Примесь титана во всех участках зерна примерно одинакова.

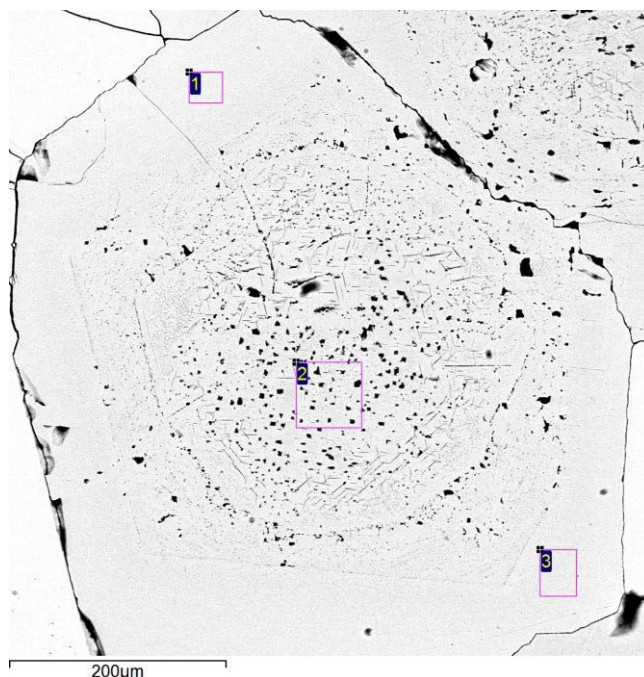


Рис. 1. Микроструктура магнетита. Пояснение в тексте. Образец 9/454,4. Месторождение Бор, скважина № 9, глубина 454,4 м.

Таблица 1. Химический состав зонального зерна магнетита, мас.%

<i>Компоненты</i>	<i>анализ 1</i>	<i>анализ 2</i>	<i>анализ 3</i>
TiO ₂	0,42	1,72	0,73
Al ₂ O ₃	–	4,59	1,34
Fe ₂ O ₃	68,15	58,64	66,26
FeO	27,33	28,28	29,19
MgO	2,06	4,63	2,39
MnO	–	0,76	-
<i>Минералы, %</i>			
FeFe ₂ O ₄	94,4	85,5	93,1
MgFe ₂ O ₄	5,1	9,2	4,7
MgAl ₂ O ₄	–	2,2	1,3
MnFe ₂ O ₄	–	1,0	–
Fe ₂ TiO ₄	0,5	2,1	0,9

Примечание: Образец 9/454,4. Номера анализов отвечают фрагментам сканирования, отмеченных цифрами на рис. 1.

Более контрастно микростроение этого зерна видно на следующих фрагментах. На рисунке 2 хорошо видна неоднородность центральной части зерна. По форме и размеру отличаются 3 разновидности выделений примесных частиц в матрице магнетита. Первая – это изометричные микрзерна шпинели размером до 5 мкм. Они окружены светлой беспримесной каймой шириной примерно в половину выделения. В некоторых частицах хорошо видны грани октаэдра. Вторая разновидность – это ламели длиной от 2 до 7 микрон, максимальной шириной

в десятки раз меньше. Они также имеют беспримесное гало. Третья разновидность – это точечные и штриховые частицы высокой плотности, выполняющие остальное пространство.

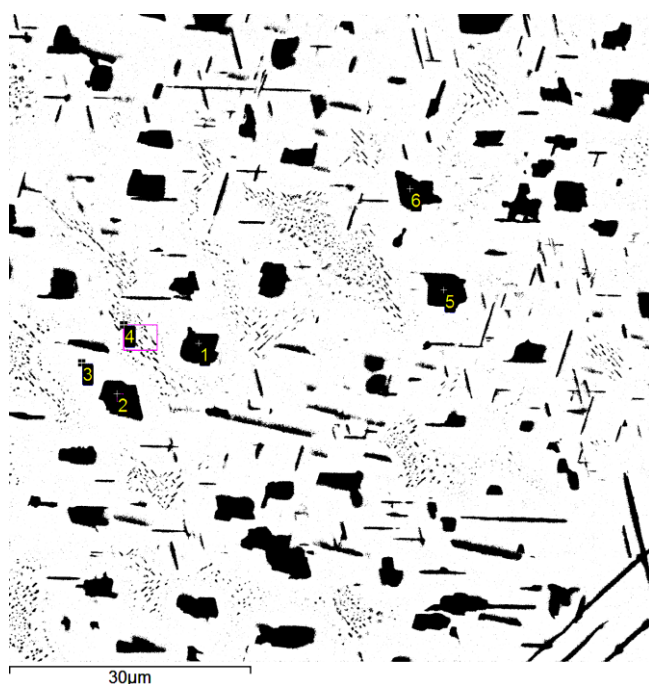


Рис. 2. Узор структур распада центральной части зерна магнетита. Пояснения в тексте.

Таблица 2. Химический состав внутренней зоны зерна магнетита, мас. %

Компоненты	1	2	3	4	5	6
TiO ₂	0,33	3,69	0,52	1,87	0,4	0,95
Al ₂ O ₃	58,35	55,7	0,57	1,95	60,88	60,05
Fe ₂ O ₃	4,35	7,47	66,42	65,46	5,42	3,54
FeO	6,44	5,14	27,29	26,65	7,15	6,23
MgO	20,75	22,33	2,32	3,33	21,66	21,64
<i>Миналы, %</i>						
FeFe ₂ O ₄	7,1	3,3	86,5	82,7	5,1	3,8
MgFe ₂ O ₄	–	1,1	11,0	6,7	–	–
MgAl ₂ O ₄	85,2	88,2	1,1	5,2	84,6	86,82
FeAl ₂ O ₄	7,1	–	–	–	9,5	3,8
Fe ₂ TiO ₄	0,6	7,4	1,4	5,4	0,8	1,9

Примечание: Номера анализов отвечают фрагментам, обозначенным соответствующими цифрами на рисунке 2. 1, 2, 5, 6 – изометричные выделения шпинели, 3 – однородный участок магнетита, 4 – участок магнетита с тонкими штриховыми выделениями

По химическому и компонентному составу (табл. 2, анализы 1, 2, 5, 6) изометричные частицы на 84,6–88,2 % состоят из алюмошпинели, 3,8–7,1 % герцинита, 3,1–7,1 % магнетита и 0,7–7,4 % ульвошпинели. Однородные участки, слагающие гало микровыделений, сложено 86,5 % магнетита, 11,0 % магнезиоферрита, 1,1 % алюмошпинели и 1,4 % ульвошпинели. Участки магнетита с точечными и штриховыми микровыделениями (анализ 4), отвечающими,

вероятно, первичному составу твердого раствора минерала, включают 5,3 % алюмошпинели, 5,4 % ульвошпинели и 6,7 % магнезиоферрита. Особенности микроструктуры и состава фрагмента кристалла, примыкающего к предыдущему участку, показаны на изображении (рис. 3) и в таблице 3. Состав изометричных частиц (анализы 1 и 4), как и в предыдущем фрагменте, отвечает алюмошпинели с примесью герцинита, магнетита, магнезиоферрита и ульвошпинели, количество которых неодинаково из-за разного размера частиц и аналитических погрешностей, из-за захвата зондом участков матрицы магнетита.

Последним обстоятельством обусловлена некоторая неопределенность состава удлинённые ламелей (анализы 2, 3, 5, 6). Они представлены тем же набором примесных компонентов, но с варьирующими количествами алюмошпинели и магнезиоферрита. Обращает внимание необычно высокое количество титана в одном из анализов, что связано с присутствием в этой части зерна относительно крупных частиц ульвошпинели. Во всех типах выделений примесных частиц и в их промежутках количество титана почти одинаково.

Это позволяет предполагать его вхождение в кристаллическую решетку шпинелидов в силу обычного изоморфизма с трехвалентным железом. Анализ 7 однородного участка отражает магнетит-магнезиоферритовый состав матрицы, оставшийся после сегрегации примесных магния и алюминия. В обозначенных цифрами 8 и 9 площадках с точечными и штриховыми выделениями примесей, таких же, как и на предыдущем снимке (4, см. рис. 2), состав отвечает, вероятно, первичному твердому раствору магнетита.

Среди хлоритизированной и рассланцованной пятнисто-вкрапленной руды (образец 10-324) сохраняются описанные выше элементы строения зерен магнетита (рис. 4). Наблюдается зональность, подчеркнутая включениями хлорита и реликтами точечных и удлинённых ламелей шпинелей. Крупных частиц распада твердого раствора нет, они замещены агрегатом вторичных минералов – хлоритом, карбонатами, серпентином, титанитом и другими. Сохранившиеся блоки (табл. 4, анализы 1, 7) содержат примеси магния и алюминия. Магнетиты изученного рудопоявления по содержанию магния, алюминия, титана и других примесных элементов близки к «магномагнетитам» месторождений Камышевский Байкитик, Хакдасис и других, отличающихся большим разнообразием текстур. Микроструктура магнетитов из этих месторождений практически не изучалась, также как и состав сопутствующих нерудных минералов. Выводы о химическом своеобразии «магномагнетитов» сделаны на основе валовых химических анализов и единичных микронзондовых определений. Наш опыт изучения магнетитов из разных парагенетических ассоциаций руд и пород железорудных месторождений ангаро-илимского типа на юге СП и полученные в данной работе материалы позволяют определить природу повышенной магнезиальности этих магнетитов. Описанные выше микроструктуры магнетитов обнаружены и в магнетитах из руд, замещающих оолиты в терригенно-карбонатных породах на месторождении Хакдасис, и в магнетитах из вкрапленных руд Камышевского Байкитика. При больших увеличениях под оптическим микроскопом выявляется тонкая неоднородность микроструктуры, наличие включений твердых частиц. В сканирующем электронном микроскопе установлены октаэдрические частицы шпинели (рис. 5, табл. 5) и точечные

микровыделения. Главными компонентами выделений и матрицы являются те же самые алюмошпинель, магнезиоферрит, герцинит и ульвошпинель, причем с теми же особенностями распределения по фазам, что и в рассмотренном выше случае.

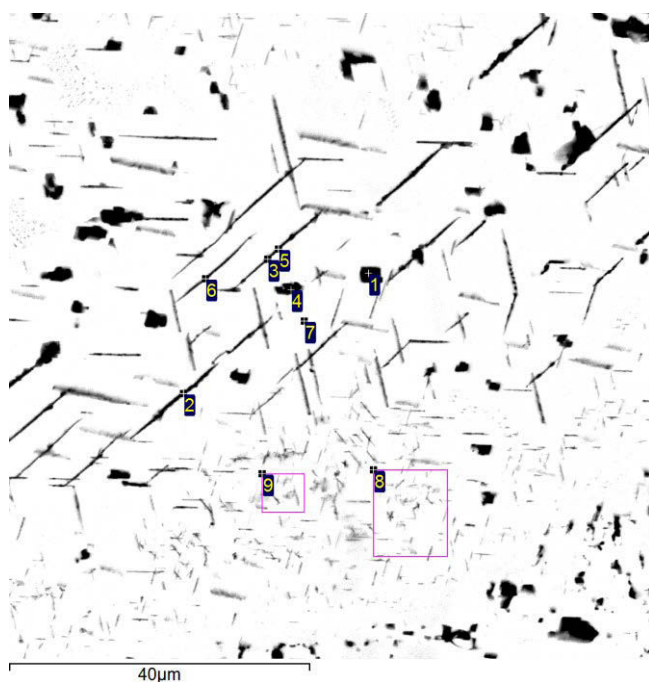


Рис. 3. Структура промежуточной зоны зонального зерна магнетита. Пояснение в тексте.

Таблица 3. Химический состав фрагментов зерна магнетита (рис. 3), мас.%

Компоненты	1	2	3	4	5	6	7	8	9
TiO ₂	0,37	5,85	0,55	–	0,38	0,3	–	0,98	1,53
Al ₂ O ₃	52,21	15,95	10,86	42,17	4,04	3,85	–	1,78	2,78
Fe ₂ O ₃	12,62	49,72	61,7	29,8	64,9	65,31	67,81	65,18	63,86
FeO	8,77	18,15	23,41	12,54	25,21	26,46	27,07	27,14	26,74
MgO	19,71	11,91	7,36	17,33	4,0	3,68	2,31	2,79	3,25
<i>Минералы, %</i>									
FeFe ₂ O ₄	13,1	26,0	62,1	28,7	76,9	79,9	86,7	81,5	83,1
MgFe ₂ O ₄	-	26,6	15,2	2,5	13,1	11,3	13,3	11,5	6,5
MgAl ₂ O ₄	80,0	32,2	21,3	68,8	8,9	8,0	–	4,1	6,1
FeAl ₂ O ₄	6,1	–	–	–	–	–	–	–	–
Fe ₂ TiO ₄	0,8	15,2	1,4	–	1,1	0,8	–	2,9	4,3

Примечание: Номера анализов отвечают фрагментам, обозначенным соответствующими цифрами на снимке. Пояснения в тексте

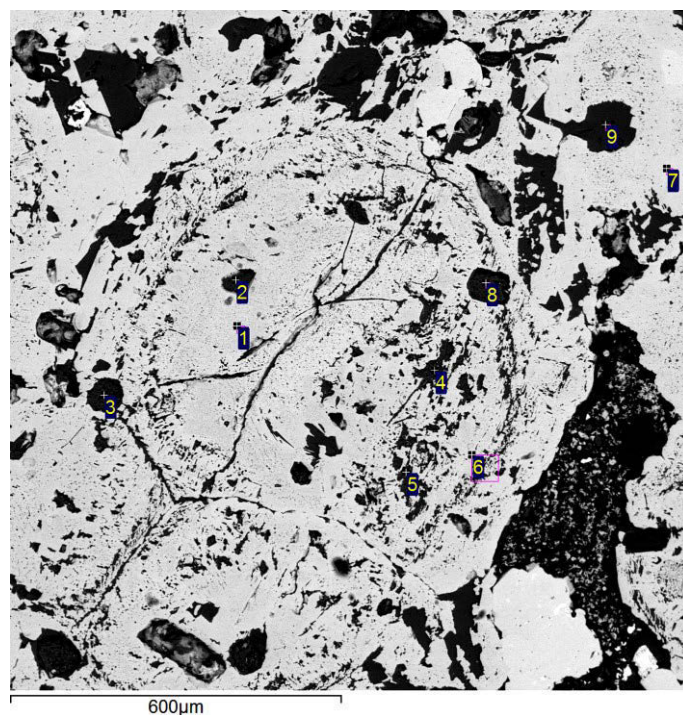


Рис. 4. Неоднородное строение зерна магнетита в рассланцованной руде. Обр. 10/324,8.

1 – магнетит с точечными выделениями шпинели и магнезиоферрита; 7 – магнезиоферрит; в остальных участках – смесь хлорита, серпентина и карбонатов.

Таблица 4. Химический состав магнетитов (мас.%). Обр. 10-324,8.

<i>Компоненты</i>	<i>1</i>	<i>2</i>
Al ₂ O ₃	1,02	–
Fe ₂ O ₃	68,35	68,43
FeO	24,8	28,34
MgO	4,13	1,76
<i>Минералы, %</i>		
FeFe ₂ O ₄	76,9	90,0
MgFe ₂ O ₄	18,6	10,0
MgAl ₂ O ₄	4,5	–

Примечание: Номера анализов отвечают цифрам фрагментов на снимке. Пояснения в тексте.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты являются первыми данными о неоднородности состава и реальной структуры магнетитов, образованных при метасоматозе терригенно-карбонатных пород (доломитов, мергелей) в контактах с породами траппового комплекса СП. Наибольший интерес представляет выявленное зональное строение и специфика узора структур подсолвусного распада твердых растворов магнетитов. Они демонстрируют, что при кристаллизации магнетит включал примеси магния, алюминия, титана, марганца, цинка, ванадия. Зональность зерен обусловлена неодинаковым, изменяющимся во времени составом

первичного минералообразующего флюида. Форма экссолюционных частиц обусловлена также различиями скорости диффузии примесных элементов при понижении температуры.

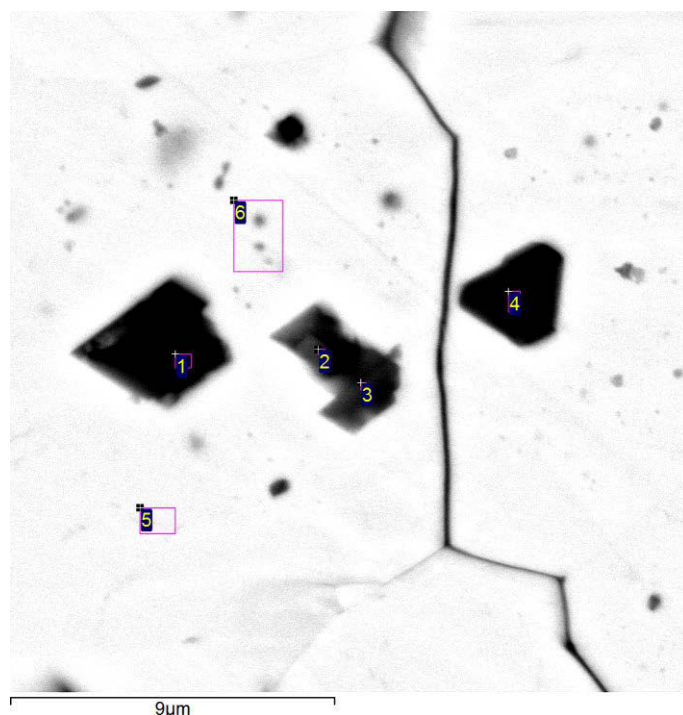


Рис. 5. Микроструктура магнетита из месторождения Хакдасис.

1-4 изометричные выделения шпинелей, 5 – однородный фрагмент магнетита, 6 – с точечными выделениями примесей. Состав приведен в таблице 5.

Таблица 5. Химический состав шпинелей и магнетита месторождения Хакдасис, мас. %

Компоненты	1	2	3	4	5	6
TiO ₂	0,62	4,15	0,4	2,42	0,37	0,37
Al ₂ O ₃	47,73	29,76	41,63	33,6	0,83	0,83
Fe ₂ O ₃	19,85	37,26	28,07	37,86	65,35	65,95
FeO	15,63	19,44	16,02	12,85	29,91	20,91
MgO	15,54	12,57	14,92	17,07	-	0,6
<i>Минералы, %</i>						
FeFe ₂ O ₄	20,4	25,8	31,1	23,1	96,6	95,8
MgFe ₂ O ₄	-	3,2	-	11,8	-	0,9
MgAl ₂ O ₄	64,2	60,3	61,8	60,0	-	2,0
FeAl ₂ O ₄	14,1	-	6,3	-	1,9	-
Fe ₂ TiO ₄	1,3	10,7	0,8	5,1	0,5	1,3

Примечание: Номера анализов отвечают цифрам на рис. 5. 1-4 – изометричные выделения шпинели; 5 – однородный фрагмент магнетита; 6 – фрагмент магнетита с точечными выделениями примесей.

Изометричные более крупные частицы шпинели в центральной части зерен магнетита концентрируют больше всего алюминия и магния. Это первая стадия распада, отражающая наиболее раннее разделение алюмо - и ферришпинелей. Кроме того, в них выявляются

примеси цинка и марганца. Это означает, что самые крупные, выделившиеся первыми частицы, являются местом стока всех примесей, имеющих близкие скорости диффузии в кристаллической решетке магнетита. Во вторую стадию в матрице магнетита выделяются удлиненно-пластичатые частицы (ламели), содержащие меньше алюминия и, соответственно меньшее количество алюмошпинелевого минала. Мелкие точечные выделения содержат еще меньше алюминия. Титан в исследованных магнетитах распределен относительно равномерно; в основном он не образует собственных частиц. В единичных случаях он фиксируется в микронных частицах, прилегающих к удлиненным ламелям. По-видимому, можно в этом случае провести аналогию со структурами в титаномагнетитах: там, на удлиненных ламелях ильменита нарастают мельчайшие изометричные частицы шпинели, а здесь – наоборот. Магний фиксируется во всех участках магнетита, как наиболее распространенный компонент его состава. Магнетит и магнезиоферрит имеют одинаковый параметр кристаллической решетки, остаются единым гомогенным твердым раствором после выделения из первичного высокотемпературного магнетита других примесных элементов.

Высокомагнезиальные магнетиты в месторождениях, связанных с траппами Сибирской платформы, образуются в контактах долеритов с доломитами и мергелями. Они локализуются во внешних частях магнезиально-скарновой колонки, в шпинель-форстеритовой и кальцифировой зонах. В рассмотренном случае, в Борском, Хакдасис и других рудопоявлениях неизменные высокотемпературные магнезиально-скарновые ассоциации не сохранились из-за интенсивно проявленной хлоритизации, серпентинизации и других преобразований. Кроме конформных долеритам рудных залежей здесь известны секущие, жильные тела, в которых руды перекристаллизованы, а первичные высокотемпературные минералы замещены вторичными гидратированными – серпентином, хлоритом, а также железистыми карбонатами, цеолитами и другими минералами. В них развиты друзы, гнезда магнезиального магнетита, директивные текстуры, характерные для жил выполнения [5]. Такой же облик имеют вторичные жильные, оолитовые, сферолитовые, полосчатые и более сложные рудные агрегаты известные на верхних горизонтах вулканотектонических построек месторождений Коршуновского и Рудногорского месторождений в южной части СП [7]. Именно с такими рудами сопоставляли Ф.Н. Шахов и В.С. Попов [16] описанное ими месторождение магнезиоферрита из района Нижней Тунгуски.

Магнетиты из рассмотренных рудных объектов по химическому составу могут рассматриваться в рамках системы $Fe_2O_4 - MgAl_2O_4 - MgFe_2O_4 - FeAl_2O_4$, результаты экспериментального и теоретического исследования которой показаны в статьях [18–20]. На фазовом квадрате этой системы (FMAF, по Sack, 1982), составы исследованных магнетитов попадают в окрестности линий, ограничивающих снизу купол несмесимости при 800°C. Как и магнетиты из контактов с доломитами и каменными солями [8–11] в южной части СП [7], исследованные магнетиты обогащены магнезиоферритом из-за сочетания высокой температуры, активности магния и потенциала кислорода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рудно-магматических системах Приенисейского района в западной части СП магнетиты являются одними из характерных минералов, образованных при взаимодействии долеритов с терригенно-карбонатными породами. Они закономерно изменяют свой состав и микроструктуру в разных парагенетических ассоциациях, отражая специфику разных стадий минералообразования в отличающихся по составу замещаемых породах. Внутри тел долеритов были образованы вкрапленные и гнездовые скопления послемагматических титаномагнетитов, а в экзоконтактах сформированы послойные и секущие залежи в преобразованных терригенно-карбонатных породах. Высокомагнезиальные магнетиты, обычно отмечаемые в литературе как магномагнетиты, представляют собой сложные твердые растворы магнетита, магнезиоферрита, алюмошпинели и герцинита. При их подсолвусном распаде сначала возникают высокоглиноземистые магний – железистые изометричные частицы до 5 микрон в поперечнике, включающие примесь марганца и цинка, а затем пластинчатые герцинит-шпинелевые частицы длиной в первые микроны и шириной в десятки раз меньше, а затем точечные выделения. Оставшиеся после этого участки можно интерпретировать как магнетит-магнезиоферритовый твердый раствор или «магномагнетит». Примесь титана в этих магнетитах распределена равномерно по всем фазам, также как и незначительное количество ванадия. Вероятно, эти элементы изоморфны трехвалентному железу и рассеяны по решетке минералов. Зональное строение магнетитов с чередованием разных по размеру и количеству эксклюзионных частиц шпинелей, ранее не описанных в литературе [17], обусловлено, вероятно, ритмичным изменением минералообразующего флюида в субвулканической обстановке.

Авторы благодарны А.П. Бронникову, И.А. Калугину, И.Г. Резникову, С.Н. Прусской за предоставленные образцы. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 12-05-00798.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бронников А.П., Васильев Ю.Р., Золотухин В.В., Мазуров М.П., Цимбалист В.Г. О первой находке массивных сульфидных Cu-Ni-Pt руд норильского типа в приустьевой части Подкаменной Тунгуски (Сибирская платформа) // ДАН, 2000. Т. 375. № 3. С. 366–369.
2. Васильев Ю.Р., Пруская С.Н., Мазуров М.П. и др. Онецкий интрузивный комплекс – новый структурный тип крупнообъемных проявлений Траппового магматизма на Сибирской платформе // Геология и геофизика, 2008. Т. 49. № 5. С. 395–409.
3. Золотухин В.В. О новом районе распространения магнезиальных траппов норильского типа на Сибирской платформе. // Докл. АН СССР, 1980. Т. 253. № 3. С. 688–693.
4. Золотухин В.В., Васильев Ю.Р., Дюжиков О.А. Магнезиальные базиты запада Сибирской платформы и вопросы никеленосности. Новосибирск: Наука, 1984, 208 с.
5. Калугин И.А., Резников И.Г., Третьяков Г.А. Магматические жилы и силлы магнетитовых руд как продукт взаимодействия базальтовой магмы с доломитами // Геология и геофизика, 1994. Т. 35. № 6. С. 30–40.

6. Лебедев А.П. Трапповая формация низовьев бассейна р. Подкаменной Тунгуски // Петрография Восточной Сибири, т.1. М.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 71–117.
7. Мазуров М.П., Бондаренко П.М. Структурно-генетическая модель рудообразующей системы ангаро-илимского типа // Геология и геофизика, 1997. Т. 38. № 10. С. 1584–593.
8. Мазуров М.П., Гришина С.Н., Титов А.Т. Магнетиты из магнезиальных скарнов на контактах долеритов с каменной солью // Геология и геофизика, 2004. Т. 45. № 10. С. 1198–1207.
9. Мазуров М.П., Гришина С.Н., Истомина В.Е. и др. Метасоматизм и рудообразование в контактах долеритов с соленосными отложениями чехла Сибирской платформы // Геология рудных месторождений, 2007. Т. 49. № 4. С. 306–320.
10. Мазуров М.П., Титов А.Т. Магнезиальные скарны из участков послойных инъекций базитовой магмы в эвапориты платформенного чехла // Геология и геофизика, 1999. Т. 40. № 1. С. 82–89.
11. Мазуров М.П., Титов А.Т. Состав, особенности кристаллизации и преобразования шпинелей в контактах долеритов с доломитами и каменной солью // Геология и геофизика, 2001. Т. 42, № 7. С. 1100–1109.
12. Мазуров М.П., Васильев Ю.Р., Шихова А.В. и др. Ассоциации и строение рудных минералов в интрузивных траппах западной части Сибирской платформы // Геология и геофизика, 2014. Т. 55. № 1. С. 94–107.
13. Модельный анализ развития континентальных мантийно-коровых рудообразующих систем. / Ред. Г.В. Поляков. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2009. 409 с.
14. Павлов Н.В. Магномагнетитовые месторождения района Тунгусской синеклизы Сибирской платформы. М., Изд-во АН СССР, 1961. 224 с.
15. Соболев В.С. Петрология траппов Сибирской платформы. Л., Изд-во Главного управления Севморпути, 1936. 227 с.
16. Шахов Ф.Н., Попов В.С. Месторождения магнезиоферрита в районе Н. Тунгуски // Изв. Томского индустриального института, 1935, вып. 14. С. 3–9.
17. Haggerty S.T. Oxide textures – a mini atlas // Rev. Miner. Geochem., 1991. V. 25. P. 129–219.
18. Lehmann J., Roux J. Experimental and theoretical study of $(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})(\text{Al}, \text{Fe}^{3+})_2\text{O}_4$ spinels: Activity-composition relations, miscibility gaps, vacancy contents // Geochim. Cosmochim. Acta, 1986. V. 50. P. 1765–1783.
19. Neil J., Wood B.J., Mason T.O. High-temperature distribution in Fe_3O_4 – MgAl_2O_4 – MgFe_2O_4 – FeAl_2O_4 spinels from thermopower and conductivity measurements // Amer. Miner., 1989. V. 74. P. 339–351.
20. Sack R.O. Spinel as petrogenetic indicators: activity-composition relations at low pressures // Contr. Miner. Petrol., 1982. V. 79. P. 169–186.