ФИЗИКА ЗЕМЛИ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

Магнитные свойства и структура хромитов состава $Fe_{2-x}Mg_xCrO_4$

В. И. Максимочкин[1,a], Р. Р. Губайдуллин[2,b], М. Я. Гареева[2]

[1] *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики Земли. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*

[2] *Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета, факультет математики и естественных наук. Россия, 453103, г. Стерлитамак, просп. Ленина, д. 47а.*

E-mail: [a] *maxvi@physics.msu.ru,* [b] *web.renald@gmail.com*

Статья поступила 28.11.2012, подписана в печать 11.01.2013.

Исследованы структурные и магнитные свойства хромитов состава $Fe_{2-x}Mg_xCrO_4$, синтезированных по керамической технологии с целью получения аналогов естественных минералов для решения задач физики магнетизма горных пород. Получены зависимости параметра кубической решетки и магнитных характеристик от состава, имеющие небольшие отклонения от линейной зависимости. В экспериментах по созданию парциальной термоостаточной намагниченности в слабых полях обнаружено свойство самообращения для некоторых составов при нагреве образцов до 600°C на воздухе. Предполагается, что самообращение вызвано неоднородностью в распределении катионов в структуре хромитов и фазовыми превращениями при окислении.

Ключевые слова: хромшпинелиды, рентгеноструктурный анализ, магнитные характеристики, самообращение.

УДК: 537.622.6. PACS: 61.05.cp, 75.50.Gg.

Введение

Хромшпинелиды, или серии твердых растворов $FeCr_2O_4$-$FeFe_2O_4$–$MgCr_2O_4$, весьма распространены в породах Земли. Они слагают ряд типов хромитовых месторождений, являются носителями намагниченности пород некоторых кимберлитовых трубок [1, 2], широко распространены в глубоководных габбро и перидотитах, а также в лунных породах и метеоритах. Изучение этих минералов также крайне важно для решения многих задач палеомагнетизма, корректной интерпретации данных разведочной геофизики.

Магнитные минералы несут информацию об эволюции геомагнитного поля и термодинамических условиях формирования пород земной коры. Область науки — палеомагнетизм, занимающаяся толкованием этой информации, сыграла значительную роль в изучении эволюции геомагнитного поля, что позже получило название «революции в науках о Земле» [3]. Палеомагнитные методы основаны на предположениях, что магнитные минералы приобрели намагниченность в окружающем геомагнитном поле во время формирования вмещающих пород, а измеренная в лаборатории намагниченность сохранила информацию о направлении и, возможно, интенсивности древнего геомагнитного поля. Общие эмпирические действия палеомагнитных методов не могут быть удовлетворительными, если применять этот метод без попытки определения магнитных минералов — носителей остаточной намагниченности и без тщательного изучения их свойств. Носителем естественной остаточной намагниченности горных пород являются природные магнитные минералы, часто встречающиеся в мелкодисперсной форме на пределе разрешающей способности оптического микроскопа, концентрация которых составляет в лучшем случае около 5% от вмещающей породы. Эти минералы относительно недоступны для исследования их внутренних свойств, поэтому многие плодотворные исследования в области магнетизма горных пород связаны с изучением синтетических аналогов, соответствующих естественным материалам, и, несомненно, оказываются полезными для понимания свойств естественных магнитных минералов и способствуют интерпретации наблюдаемых магнитных свойств горных пород.

Литературные данные о магнитных свойствах хромшпинелей и их изоморфных серий с другими шпинелидами весьма незначительны.

Система твердого раствора $(1-x)FeCr_2O_4$–$xFeFe_2O_4$, образующаяся из хромита при замещении Cr^{3+}—Fe^{3+}, достаточно хорошо изучена [4–8]. Исследования некоторых $(Fe,Cr,Ti)_3O_4$ шпинелидов представлены в [9, 10]. Также имеются данные о ферритах составов $MnFe_{2-x}Cr_xO_4$ [11, 12] и $ZnFe_xCr_{2-x}O_4$ [13].

Данные о смесимости для системы твердых растворов хромит-магнетит $FeCr_2O_4$-$FeFe_2O_4$ противоречивы. Полная смесимость по данным различных авторов колеблется от 700 до 1100°C [5, 14].

Собственно хромит $FeCr_2O_4$ имеет структуру прямой шпинели, а магнетит — структуру обращенной шпинели. Зависимость параметра элементарной ячейки от состава в ряду $(1-x)FeCr_2O_4$–$xFeFe_2O_4$ изменяется от $a = 8.378$ до 8.407 Å и не описывается монотонной плавной кривой [4], что было объяснено изменением катионного распределения при замещении Cr^{3+}—Fe^{3+}, при этом точка Кюри нелинейно, но монотонно изменяется от 80 до 850 K.

Из литературы также известно [2, 6], что природные хромшпинелиды, или иногда их называют хромиты, содержат изоморфные примеси двух- и трехвалентных катионов марганца, магния, цинка, алюминия, а также

четырехвалентного титана. Наиболее распространено замещение Fe^{2+} на Mg^{2+}, имеются данные по твердым растворам серии $MgCr_2O_4$–$FeCr_2O_4$ [15, 16]. Свойства хромшпинелида состава $Fe^{3+}Fe^{2+}_{1-x}Mg_xCrO_4$ оказались в литературе менее изучены, в то время как исследования свойств шпинелида такого состава могут быть очень интересны для решения задач палеомагнетизма. Интерес обусловлен тем, что при замещении Fe^{2+} на Mg^{2+} в системе $FeCr_2O_4$–$(Fe,Mg)Fe_2O_4$ возможна компенсация магнитных моментов подрешеток при определенном катионном распределении $Fe^{3+}[Mg_{0.5}Cr_{1.0}Fe^{2+}_{0.5}]O_4$ [6], что может приводить к появлению такого свойства, как самообращение намагниченности в ферримагнитном минерале [17, 18].

Настоящая работа посвящена изучению минералов состава $Fe_{2-x}Mg_xCrO_4$.

1. Синтез образцов и методика измерений

Исходными материалами для приготовления хромитов $Fe_{2-x}Mg_xCrO_4$ ($x = 0$, 0.1, 0.2, ..., 1) были оксиды FeO, Fe_2O_3, MgO и Cr_2O_3. Реактивы растирались вместе в агатовой ступке в течение 10 мин и затем прессовались в таблетки. Синтез производился методом керамического обжига в муфельной печи при температуре 1000°C в среде аргона в течение 11 ч. Процесс охлаждения происходил со средней скоростью 3°C/c.

Полученные образцы были исследованы методом порошковой рентгеновской дифракции на дифрактометре ДРОН-4 в CuK_α излучении. Съемки производились в интервале углов 20–80°.

Намагниченность насыщения σ_s определялась с помощью микровеберметра по методу Вейса и Форрера [19] в поле индукцией 0.4 Тл. Погрешность определения σ_s составляла около 3%. Термомагнитный анализ проводился по зависимости намагниченности от температуры $\sigma_s(T)$ в поле 0.24 Тл, которая измерялась на вибрационном магнитометре, а также по температурной зависимости магнитной восприимчивости $\kappa(T)$, которая измерялась прибором MFK1-A фирмы AGICO. Точка Кюри T_C рассчитывалась по зависимости $\sigma_s = k(T_c - T)^{1/2}$ [20]. Гистерезисные свойства, а также термоостаточное намагничивание в слабых полях исследовались на магнитометре ВМА-1 [21]. Коэрцитивная H_c и остаточная коэрцитивная H_{cr} силы определялись по «спинке» размагничивания петли гистерезиса после предварительного намагничивания образца в поле 0.4 Тл. Оценка доменной структуры зерен полученных минералов производилась с использованием диаграммы Дея [22] по значениям отношений σ_{rs}/σ_s и H_{cr}/H_c, где σ_{rs} — удельная остаточная намагниченность насыщения, которая измерялась с погрешностью, не превышающей 1–2%.

2. Результаты исследований

2.1. Характеристика образцов

Полученные в результате синтеза хромиты были охарактеризованы рентгенофазным анализом в CuK_α-излучении. Анализ рентгенограмм показал, что все исследуемые составы имеют структуру шпинели с кубической кристаллической решеткой ($Fd3m$).

Параметр элементарной ячейки уменьшается с увеличением концентрации магния во всем исследуемом диапазоне x. Зависимость параметра решетки от состава $a(x)$ (рис. 1) имеет небольшое отрицательное отклонение от закона Вегарда [23]. На всех рентгенограммах образцов не наблюдалось дополнительных рефлексов, что говорит о хорошей смешиваемости оксидов металлов в твердый раствор. Значения параметра решетки крайних членов ряда достаточно хорошо согласуются с ранее полученными данными $a = 8.396$ Å и $a = 8.375$ Å соответственно для Fe_2CrO_4 и $FeMgCrO_4$ [4, 24].

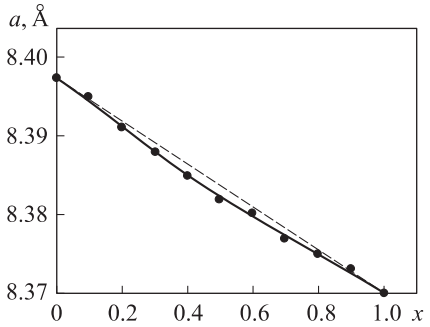

Рис. 1. Зависимость параметра решетки от состава в хромитах $Fe_{2-x}Mg_xCrO_4$

Магнитные характеристики синтезированных хромитов

Состав	a, Å	a (окисл.), Å	H_c, мТл	H_{cr}, мТл	σ_{rs}, А·м²/кг	σ_s, А·м²/кг	T_c, °C	H_{cr}/H_c	σ_{rs}/σ_s
Fe_2CrO_4	8.398	8.346	10.4	22.1	4.2	40	280	2.11	0.105
$Fe_{1.9}Mg_{0.1}CrO_4$	8.395	8.369	8.05	14.8	3.2	31	240	1.84	0.10
$Fe_{1.8}Mg_{0.2}CrO_4$	8.391	8.317	9.81	17.7	3.8	34	210	1.80	0.11
$Fe_{1.7}Mg_{0.3}CrO_4$	8.388	8.312	7.79	14.3	2.0	18	150	1.83	0.11
$Fe_{1.6}Mg_{0.4}CrO_4$	8.385	8.323	4.63	9.62	1.3	13	110	2.08	0.10
$Fe_{1.5}Mg_{0.5}CrO_4$	8.382	8.338	3.74	7.05	1.40	18	115	1.89	0.05
$Fe_{1.4}Mg_{0.6}CrO_4$	8.380	8.335	3.61	8.49	0.49	8	90	2.35	0.06
$Fe_{1.3}Mg_{0.7}CrO_4$	8.377	8.331	2.46	5.51	0.34	6	60	2.24	0.06
$Fe_{1.2}Mg_{0.8}CrO_4$	8.375	8.338	2.86	6.52	0.34	5	80	2.28	0.07
$Fe_{1.1}Mg_{0.9}CrO_4$	8.373	8.354	3.68	7.28	0.54	8	120	1.98	0.07
$FeMgCrO_4$	8.370	8.370	3.21	9.31	0.32	7	120	2.90	0.046

2.2. Результаты магнитных измерений

Результаты магнитных измерений обобщены в таблице. Кривые термозависимости намагниченности в поле $H = 0.24$ Тл для всего ряда составов исследованных хромитов показаны на рис. 2.

Стоит отметить экспоненциально спадающие кривые термозависимости намагниченности, наблюдаемые на большинстве образцов, крутизна которых усиливается к конечным составам ряда. Для составов с $x = 0$, 0.1, 0.2 и 0.3 ход температурной зависимости σ_s (рис. 2, *а–г*) имеет некоторый спад в области температур 200–300 °C, после которого сохраняется значительная намагниченность вплоть до $T = 500$ °C. Такое поведение можно объяснить получением при синтезе неоднородного магнитного состояния в рамках структурной однофазности составов.

Для всех синтезированных хромшпинелидов кривые нагревания и охлаждения не совпадают. Для богатых железом составов после нагрева наблюдается уменьшение температуры Кюри и уменьшение намагниченности в поле 0.24 Тл. Твердые растворы, богатые магнием, из конца исследуемой серии, напротив, после нагрева имеют более высокую точку Кюри и большую намагниченность, чем до нагрева.

Вероятно, в процессе измерений термозависимости σ_s происходит окисление хромита, которое приводит к фазовым превращениям. Аналогичная закономерность наблюдалась на зависимости магнитной восприимчивости от температуры $\kappa(T)$ (рис. 3).

Рис. 4, 5 показывают зависимость удельной намагниченности при комнатной температуре и точки Кюри от параметра состава x.

Значения температуры Кюри и удельной намагниченности насыщения для хромита Fe_2CrO_4 оказались завышенными по сравнению с ранее полученными в работе [4] данными: $T_C = 180$ °C и $\sigma_s = 30$ А·м^2/кг. В то же время зависимости $\sigma_s(x)$ и $T_C(x)$ показывают, что в целом удалось выявить закономерное уменьшение удельной намагниченности насыщения при комнатной температуре и температуры Кюри с ростом содержания магния в хромшпинелиде — примерно от $x = 0$ до $x = 0.7 \div 0.8$, T_C с ростом x в интервале $0.7 \div 1.0$ слабо растет, а σ_s практически не меняется.

Значения σ_{rs}/σ_s для всех составов лежат в интер-

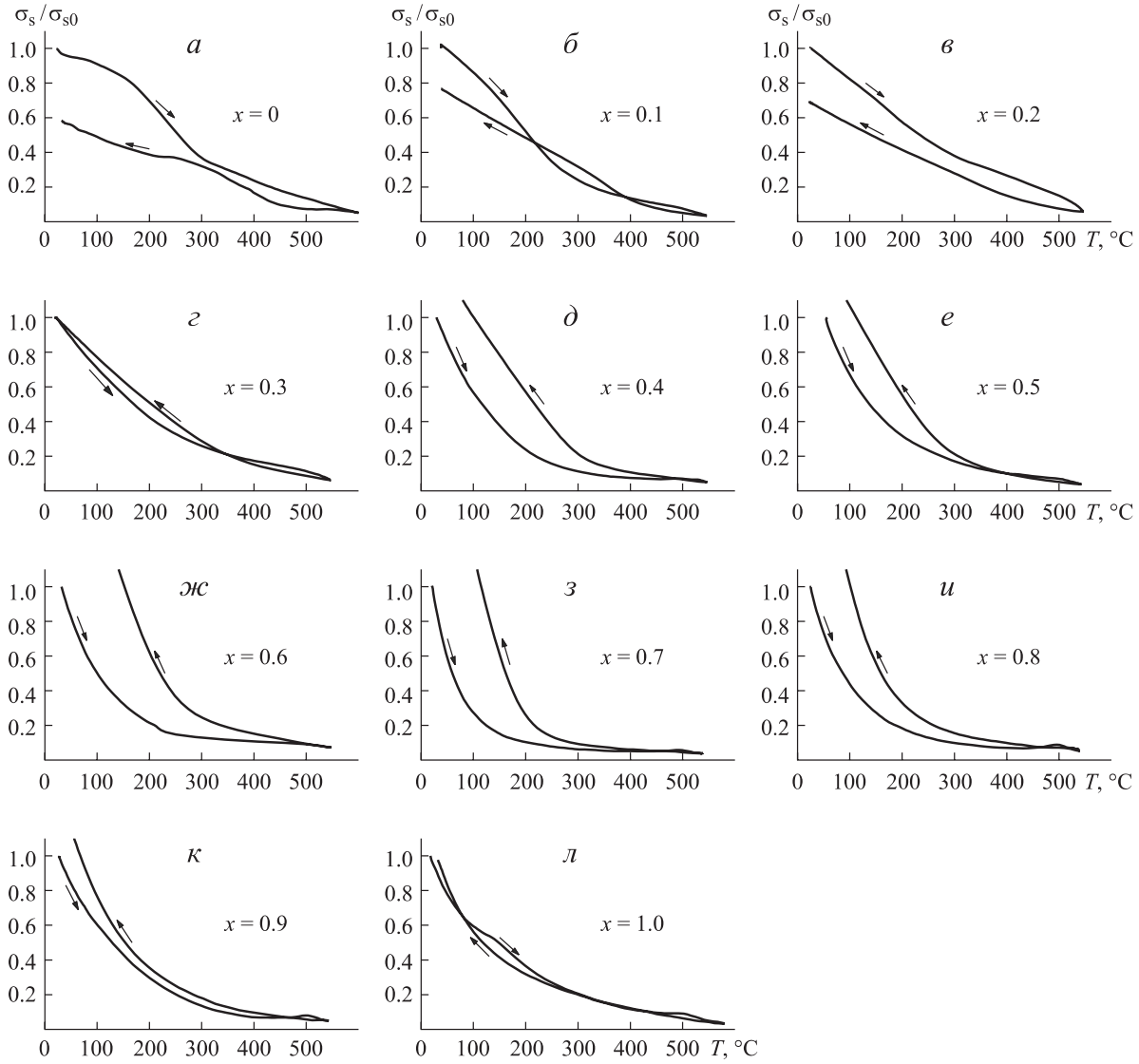

Рис. 2. Термомагнитные кривые хромитов $Fe_{2-x}Mg_xCrO_4$ в поле $H = 0.24$ Тл

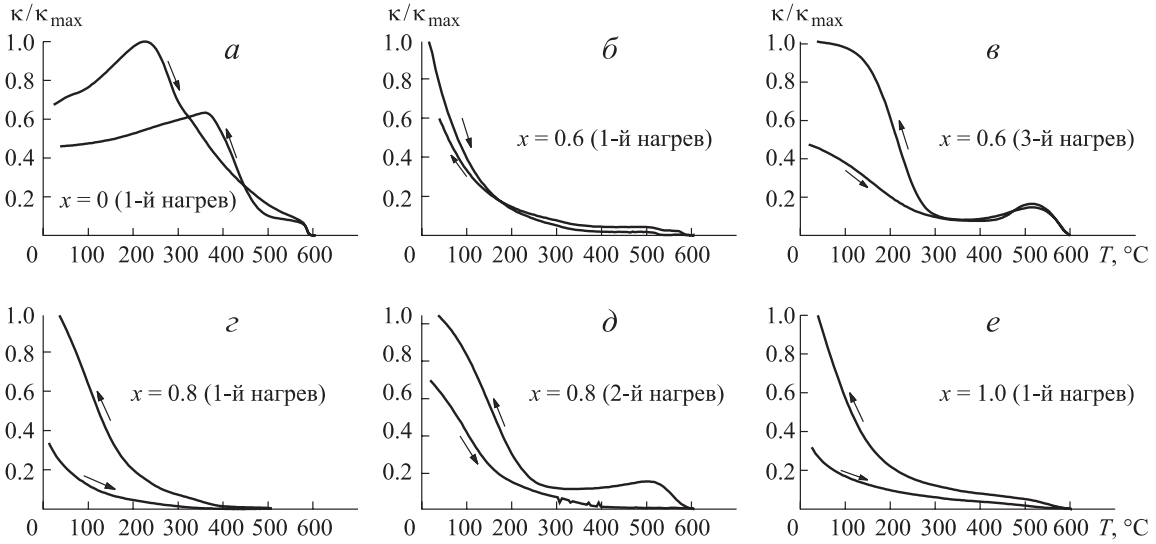

Рис. 3. Термозависимости магнитной восприимчивости $\kappa(T)$ хромитов $Fe_{2-x}Mg_xCrO_4$

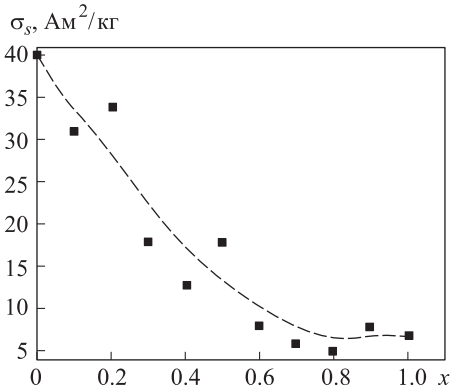

Рис. 4. Зависимость удельной намагниченности при 20°C в поле $H = 0.24$ Тл от состава

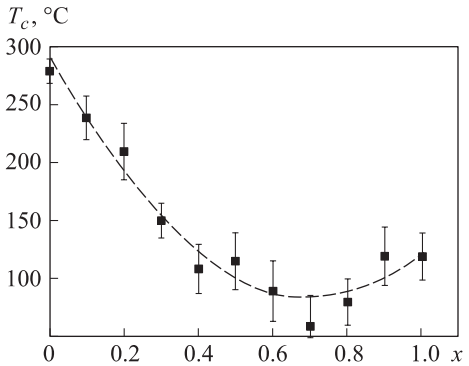

Рис. 5. Зависимость точки Кюри от состава

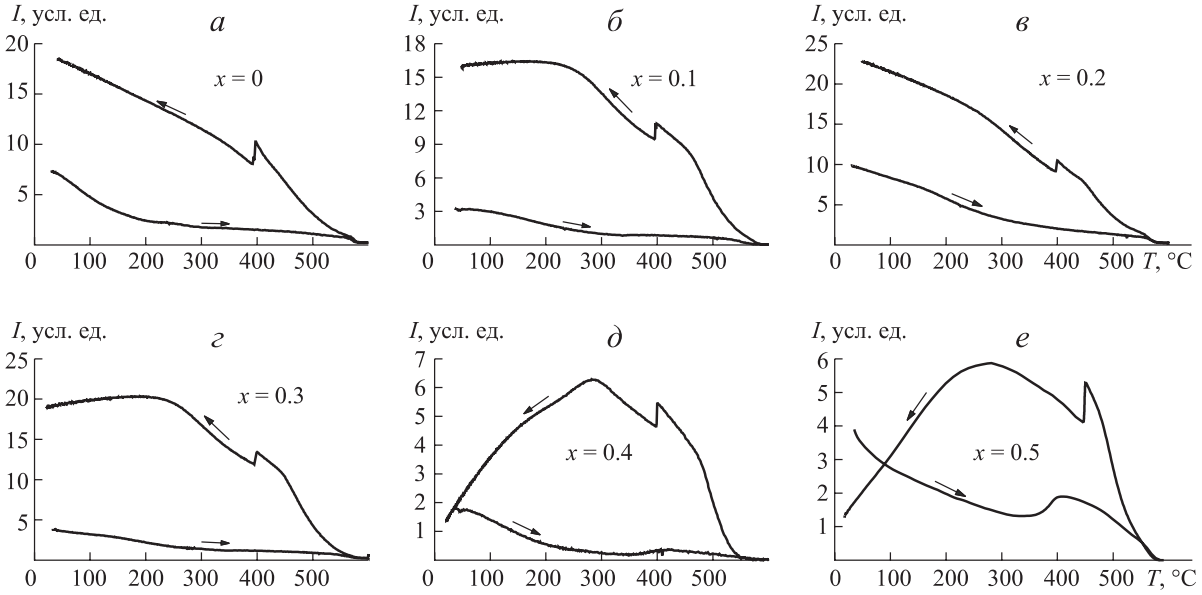

Рис. 6. Создание pTRM для хромитов $Fe_{2-x}Mg_xCrO_4$: *а–д* — $x = 0 \div 0.4$, поле 0.2 мТл, (20:600:400°C); *е* — $x = 0.5$, поле 0.2 мТл, (20:600:450°C)

вале (0.05, 0.5), а отношения $H_{\text{сг}}/H_{\text{с}}$ — в интервале (1.5, 4). Таким образом, исходя из диаграммы Дея состояние доменной структуры зерен всех полученных хромшпинелидов — псевдооднодоменное.

2.3. Термонамагничивание хромшпинелидов составов $Fe_{2-x}Mg_xCrO_4$

Результаты термомагнитного анализа образцов синтезированных хромшпинелидов $Fe_{2-x}Mg_xCrO_4$ в сильных и слабых полях свидетельствуют о том, что полное размагничивание образцов происходит при температурах около 600 °C, кроме того, при нагреве до этой температуры наблюдался рост точки Кюри исходной фазы, связанный с окислением хромитов. Неоднократные нагревы до $T = 600$ °C приводили к появлению небольшого количества ферримагнетика с точкой Кюри $T_{\text{C}} = 580$–590 °C (рис. 3, *в, д*).

В поле индукцией 0.2 мТл были проведены эксперименты по созданию парциальной термоостаточной намагниченности (pTRM) при охлаждении образцов от температуры 600 °C. Результаты представлены на рис. 6–10. Для хромшпинелидов составов $x = 0$, 0.1, 0.2 и практически 0.3 после отключения поля при $T = 400$ °C наблюдался рост остаточной намагниченности (рис. 6, *а–г*), на образцах с составом $x = 0.4$, 0.5, 0.6, 0.7 (рис. 6, *д, е*, рис. 7, 8) рост остаточной намагниченности при охлаждении образцов при температурах 200–300 °C сменялся уменьшением.

На рис. 7 показаны кривые для состава $x = 0.6$ по созданию pTRM в поле 0.2 мТл в интервале температур (600:400 °C) и (600:350 °C). В обоих случаях имеется максимум намагниченности при $T = 240$ °C, после которого наблюдалось уменьшение остаточной намагниченности. Этот эффект имеет большую амплитуду в случае отключения поля при $T = 350$ °C, при этом остаточная намагниченность образца меняет знак при $T = 50$ °C, т. е. наблюдалось полное самообращение остаточной намагниченности.

На составе $x = 0.7$ было получено полное самообращение остаточной намагниченности при создании pTRM (600:350 °C; 0.2 мТл), кривые показаны на рис. 8. Стоит отметить высокое значение индуктивной составляющей намагниченности при температуре $T = 350$ °C для состава $x = 0.7$, причина которой пока не ясна.

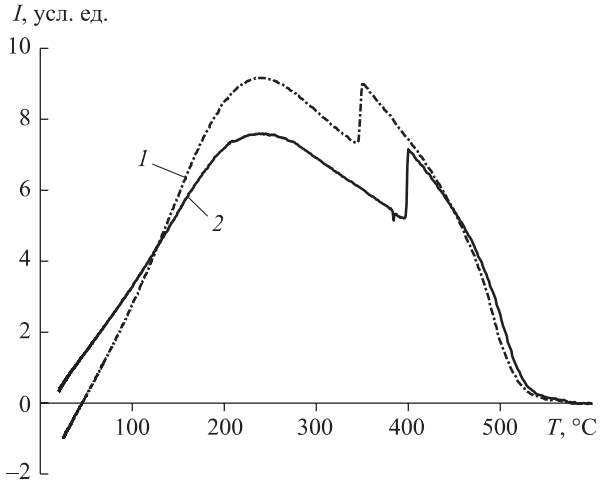

Рис. 7. pTRM в поле 0.2 мТл в интервале температур (600:350 °C) (*1*) и (600:400 °C) (*2*). Состав $Fe_{1.4}Mg_{0.6}CrO_4$

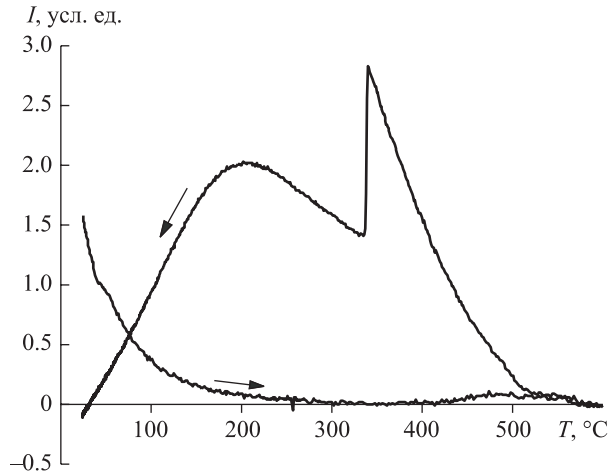

Рис. 8. pTRM в поле 0.2 мТл в интервале температур (600:350 °C) для состава $Fe_{1.3}Mg_{0.7}CrO_4$

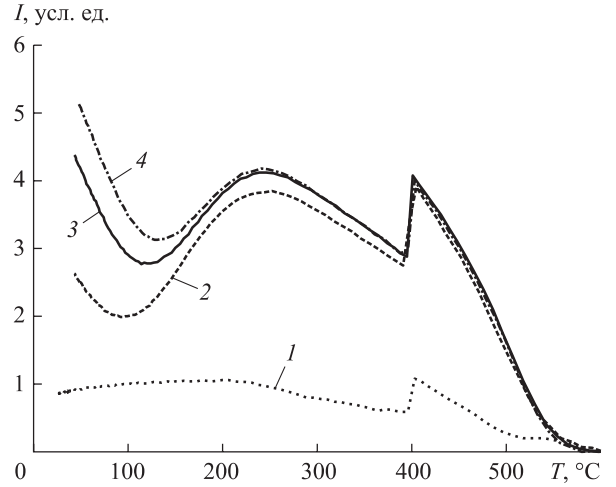

Рис. 9. pTRM (600:400 °C) в поле 0.2 мТл, кривые охлаждения. Цифры указывают на цикл нагрева. Состав $Fe_{1.2}Mg_{0.8}CrO_4$

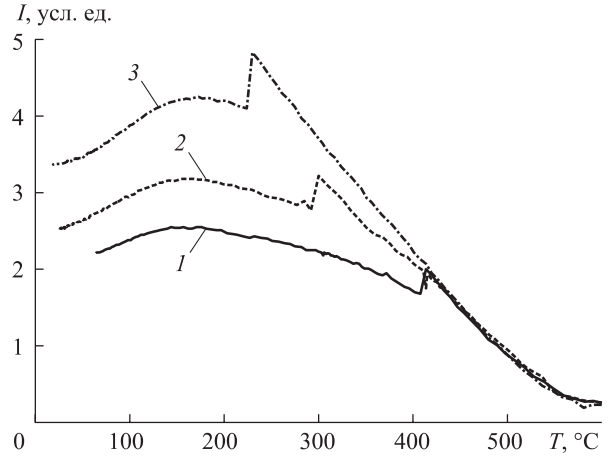

Рис. 10. pTRM в поле 0.2 мТл в интервале температур: кривая *1* — 600:410 °C; кривая *2* — 600:300 °C; кривая *3* — 600:230 °C. Состав: $FeMgCrO_4$

На рис. 9 представлены результаты эксперимента по созданию pTRM (600:400 °C; 0.2 мТл) для состава $x = 0.8$. Во время первого охлаждения образуется термоостаточная намагниченность, которая растет до $T = 240\,^\circ$C и далее имеет небольшой излом в направлении уменьшения намагниченности. После второго нагрева происходит образование заметно большей pTRM, чем при первом нагреве, и кривая также имеет максимум при температуре около 240 °C. Затем намагниченность значительно падает до минимума при $T \cong 100\,^\circ$C, после которого снова наблюдается рост намагниченности.

Формы кривых pTRM(T) при охлаждении образца после второго, третьего и четвертого нагревов повторяются, но наблюдается тенденция к спрямлению кривой pTRM(T) и увеличению минимального значения остаточной намагниченности в области $T = 100\,^\circ$C.

На рис. 10 показаны кривые намагниченности при охлаждении образца состава $FeMgCrO_4$ с включением поля в различных интервалах температур после циклических нагревов. Во всех случаях наблюдался максимум намагниченности в области $T = 170\,^\circ$C, не зависящий от цикла нагрева, в отличие от образцов других составов.

Стоит отметить, что нагревы на воздухе для данного шпинелида не приводят к фазовым превращениям, потому как состав $x = 1.0$ не предполагает наличия железа в двухвалентном состоянии и синтез происходил без использования оксида FeO. Несоответствие кривых нагрева и охлаждения $\sigma_s(T)$ и $\kappa(T)$ (рис. 2, *л*, рис. 3, *е*) связано с инертной средой во время синтеза состава и, вероятно, с происходящими слабыми восстановительными процессами оксида Fe_2O_3 во время спекания. Поэтому свойство неполного самообращения намагниченности после образования pTRM для состава $FeMgCrO_4$ оказалось устойчиво к окислительной среде.

3. Обсуждение результатов исследований

Хромиты состава $Fe_{2-x}Mg_xCrO_4$, синтезированные в настоящей работе, из-за наличия ионов Cr^{3+} и немагнитных ионов Mg^{2+} могут иметь фрустрированную магнитную структуру [26, 27], т. е. структуру, в которой магнитный порядок не распространяется на весь объем образца, а имеются отдельно намагниченные микроскопические области. Синтезированные шпинелиды могут иметь скопления однотипных ионов, что приведет к возникновению областей, обогащенных атомами железа и атомами хрома. Такое состояние образцов приводит к экспоненциально спадающей термозависимости удельной намагниченности в сильном поле и завышению T_C и σ_s.

Мёссбауэровские исследования состава $FeMgCrO_4$ ($x = 1.0$), синтезированного по керамической технологии на воздухе, показывают появление довольно большого количества железа в двухвалентном состоянии [25]. Таким образом, можно считать, что в шпинелидах богатых магнием к концу исследуемой серии возникает значительное количество связей Fe^{3+}–Fe^{2+}, которые сохраняют значение удельной намагниченности и немного повышают температуру Кюри для составов с $x = 0.7 \div 1.0$.

Можно предположить, что неполное самообращение хромита $FeMgCrO_4$ связано с наличием в стуктуре шпинели отдельных областей, богатых железом, которые намагничиваются во внешнем магнитном поле и на которых создается pTRM. Области, обогащенные хромом, намагничиваются при температурах ниже 170–190 °C и в отсутствие внешнего поля против остаточной намагниченности зон, богатых железом, из-за отрицательного ферримагнитного взаимодействия.

На образцах составов с $x = 0.3 \div 0.8$ такие эффекты, мы предполагаем, усиливаются вследствие окисления. Рентгеноструктурный анализ окисленных порошков показывает уменьшение параметра кубической решетки (таблица) с небольшим образованием гематитовой фазы для составов $x = 0 \div 0.2$ и отсутствие фазовых превращений для составов $x = 0.3 \div 1.0$. Вероятно, сохранение кубической структуры связано с наличием в составах оксида магния [28].

Исследование процесса окисления хромита Fe_2CrO_4 [8], который происходит без кристаллографических трансформаций в интервале температур 160–500 °C, предполагает образование Fe^{3+} из Fe^{2+} и катионных вакансий. Кроме того, на поверхности зерен образуется катионодефицитный слой шпинели, содержащий в основном ионы Fe^{3+}. Таким образом от поверхности к центру зерна возникает градиент в содержании железа Fe^{3+}, ответственный за полное самообращение pTRM на образцах составов $x = 0.6,\ 0.7$.

Аналогично, как и для хромита $FeMgCrO_4$, парциальная термоостаточная намагниченность образуется на богатых железом областях, находящихся в основном на границе зерна. Затем при дальнейшем остывании центр частицы намагничивается противоположно в поле образованной pTRM.

Мы предполагаем, что поведение термозависимости pTRM состава $x = 0.8$ связано как с наличием обогащенной железом границей после окисления, так и с наличием отдельных скоплений однотипных ионов в общей стуктуре шпинелида. Таким образом, состав имеет одновременно особенности хромитов из середины и конца исследуемой серии.

Исследуемая серия минералов при нахождении в земной коре может являться основным носителем естественной остаточной намагниченности хромсодержащих горных пород, о чем свидетельствуют значения температуры Кюри, коэрцитивной силы, а также оценка доменной структуры полученных шпинелидов. Причем стабильнось к окислению хромитовой низкотемпературной магнитной компоненты возрастает при большем содержании магния (рис. 3, *в, д*).

Температура Кюри для природных минералов довольно часто оказывается завышенной по сравнению с синтезированными составами [29]. Это можно объяснить наличием неоднородностей и процессами метаморфизма, которые вполне естественны для натуральных ферримагнетиков.

Явление самообращения, обнаруженное в настоящей работе на синтезированных образцах, может проявляться на природных хромитах аналогичного состава при низкотемпературном окислении минералов горных пород. Обратную намагниченность при этом будет со-

держать образующийся на периферии зерна высокотемпературный богатый железом компонент.

Заключение

Как показали исследования, проведенные на синтезированных хромитах составов $Fe_{2-x}Mg_xCrO_4$, в твердых растворах данной серии происходят практически линейные уменьшения параметра кубической решетки с увеличением содержания магния, при этом уменьшение температуры Кюри и намагниченности насыщения при комнатной температуре наблюдаются в интервале $x = 0 \div 0.7$, 0.8, а в интервале $x = 0.8 \div 1.0$ значение σ_s не меняется, точка Кюри слабо растет.

Полученные для хромшпинелидов $Fe_{2-x}Mg_xCrO_4$ основные магнитные характеристики позволяют предположить, что данные минералы могут являться основными носителями намагниченности хромсодержащих пород, а присутствие магния в составах повышает стабильность хромитов к окислительным процессам.

Обнаружены свойства самообращения намагниченности при создании pTRM в поле 0.2 мТл, интенсивность которых связана с окислительными процессами, происходящими при нагревании образцов на воздухе. Механизмы, вызывающие особенности поведения термоостаточной намагниченности, вероятно, связаны с присутствием неупорядоченности в распределении катионов в структуре шпинели, степень которой увеличивается после нагревания хромитов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 11-05-00740, 13-05-00514).

Список литературы

1. *Гаранин В.К., Бовкун А.В., Гаранин К.В.* и др. Микрокристаллические оксиды из кимберлитов России. М., 2009.
2. *Максимочкин В.И., Трухин В.И., Минина Ю.А.* и др. // Изв. РАН. Физика Земли. 2013. № 2. С. 143.
3. *Hallam A.* A revolution in the Earth sciences: from continental drift to plate tectonics. Oxford, 1973.
4. *Robbins M., Wertheim G.K., Sherwood R.C., Buchanan D.N.E.* // J. Phys. Chem. Solids. 1971. **32**, N 3. P. 717.
5. *Кудрявцева Г.П., Гаранин В.К., Жиляева В.А., Трухин В.И.* Магнетизм и минералогия природных ферримагнетиков. М., 1982.
6. *Кудрявцева Г.П.* Ферримагнетизм природных оксидов. М., 1988.
7. *Quintiliani M., Andreozzi G., Skogby H.* // Per. Mineralogia. 2011. **80**, N 1. P. 39.
8. *Domenichini B., Amilain-Basset K., Bourgeois S.* // Surface and Interface Analysis. 2002. **34**, N 1. P. 527.
9. *Schmidbauer E.* // J. Phys. Chem. Solids. 1971. **32**, N 1. P. 71.
10. *Schmidbauer E.* // Solid State Commun. 1976. **18**, N 3. P. 301.
11. *Dmitrieva T.V., Lyubutin I.S., Pokrovskii B.I., Bondareva N.D.* // JETP, 1973. **36**, N 4. P. 709.
12. *Gorter E.W.* // Philips Res. Rep. 1954. **9**. P. 295; 403.
13. *Oles A.* // Phys. Status Solidi 1970. **3**, N 3. P. 569.
14. Минералы: Справочник. Т. 2. М., 1967.
15. *Lenaz D., Skogby H.* // Per. Mineralogia. 2003. **72**. P. 69.
16. *Lenaz D., Skogby H., Princivalle F., Hålenius U.* // Phys Chem Minerals. 2004. **31**. P. 633.
17. *Трухин В.И., Безаева Н.С.* // Успехи физ. наук. 2006. **176**, № 5. С. 507.
18. *Трухин В.И., Максимочкин В.И., Елесин Ю.А., Жиляева В.А.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2007. № 1. С. 51.
19. *Чечерников В.И.* // Магнитные измерения. М., 1969.
20. *Кринчик Г.С.* // Физика магнитных явлений. М. 1976.
21. *Максимочкин В.И., Трухин В.И., Гарифуллин Н.М., Хасанов Н.А.* // Приб. и техн. эксперимента. 2003. **46**, № 5. С. 1.
22. *Day R., Fuller M., Schmidt V.A.* // Phys. Earth Planet. Inter. 1977. **13**, N 4. P. 260.
23. *Vegard. L.* // Z. Phys. 1921. **5**. P. 17.
24. *Ulmer G.C., Smothers W.J.* // J. Am. Ceram. Soc. 1968. **51**, N 6. P. 315.
25. *Singh M.R., Bhargava S.C.*// J. Phys. Condens. Matter. 1992. **4**, N 39. P. 7937.
26. *Poole C.P., Farach H.A.* // Z. Phys. B. Condens. Mater. 1982. **47**, N 1. P. 55.
27. *Mohan H., Shaikh I.A., Kulkarni R.G.* // J. Phys. Condens. Matter. 1996. **217**, N 3–4. P. 292.
28. *Баринов Г.И., Аплеснин С.С.* // ФТТ. 2006. **48**, № 1. С. 80.
29. *Kumar A., Bhalla M.S.* // Geophys. Res. Lett. 1984. **11**, N 3. P. 177.

Magnetic properties and structure of $Fe_{2-x}Mg_xCrO_4$ chromites

V. I. Maksimochkin[1,a], **R. R. Gubaidullin**[2,b], **M. Ya. Gareeva**[2]

[1] *Department of Physics of the Earth, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.*

[2] *Faculty of Mathematics and Natural Sciences, BashSU Sterlitamak Branch, Sterlitamak 453103, Russia.*

E-mail: [a] *maxvi@physics.msu.ru,* [b] *web.renald@gmail.com.*

The structural and magnetic properties of chromite $Fe_{2-x}Mg_xCrO_4$ synthesized by ceramic method for the purpose of receiving analogs of natural minerals for the solution of problems of rock magnetism are investigated. Dependences the lattice constant of a cubic and magnetic properties of the composition with small deviations from linearity are obtained. In experiments in the creation of the partial thermoremanent magnetization in weak fields property of the self-reversal for some compositions is revealed, when heating samples to 600 °C on the air. It is taken to be that the self-reversal is caused by heterogeneity in distribution of cations in the structure of chromite and phase transformations during oxidation.

Keywords: Cr-spinel, X-ray analysis, magnetic properties, self-reversal.

PACS: 61.05.cp, 75.50.Gg.

Received 28 November 2012.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 3(2013).

Сведения об авторах

1. Максимочкин Валерий Иванович — докт. физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-48-81; e-mail: maxvi@physics.msu.ru.
2. Губайдуллин Ренальд Рафаилович — аспирант; e-mail: web.renald@gmail.com.
3. Гареева Магира Ямгетдиновна — канд. физ.-мат. наук, профессор.