

## СПЕКТРАЛЬНЫЙ ТЕРМОМАГНИТНЫЙ АНАЛИЗ ГОРНЫХ ПОРОД

Изложен метод спектрального терромагнитного анализа ферромагнитной фракции горных пород, позволяющий по кривой температурной зависимости намагниченности насыщения  $I_s$  с высокой точностью определить точки Кюри многофазной ферромагнитной фракции, а также количество фаз и вклад каждой фазы в суммарную величину  $I_s$  образца.

**Введение-** Ферромагнитная фракция горных пород имеет, как правило, сложный состав, обусловленный химическими превращениями первичных минералов (например, распад и окисление титаномagnetита), появлением новых ферромагнитных и неферромагнитных минералов (например, magnetита из вюститa, пирротина из пирита) и т.д. Информацию о фазовом составе ферромагнитной минералогической фракции несут такие магнитные характеристики, как спонтанная намагниченность  $I_s$  и точка Кюри  $\theta$ . Метод определения фазового состава на основе экспериментальной зависимости  $I_s$  от температуры ( $T$ ) называется терромагнитным анализом. Кривые  $I_s(T)$  дают возможность определить точки Кюри ферромагнитных минералов, содержащихся в образце горной породы, без их извлечения из породы. В процессе нагрева образца изменение его полной  $I_s$  может происходить не только в результате увеличения тепловой энергии, разрушающей ориентацию магнитных моментов атомов в домене, но и за счет химических превращений ферромагнитных минералов. В обоих случаях определение точек Кюри по кривой  $I_s(T)$  является достаточно сложной задачей в связи с отсутствием математических методов анализа.

Как правило, анализ кривых  $I_s(T)$  производится визуально и их интерпретация в значительной степени зависит от опыта исследователя. Существующий метод термодифференциального анализа кривых  $\frac{dI_s}{dT}(T)$  [1] не обеспечивает достаточной точности

определения температур Кюри. Проблема создания математических методов анализа кривых  $I_s(T)$  является очень актуальной, так как терромагнитный анализ служит основным методом магнитного фазового анализа вещества. В связи с этим нами была осуществлена разработка метода спектрального анализа терромагнитных кривых  $I_s(T)$ , о результатах которой сообщается в данной статье.

**Обоснование методики спектрального терромагнитного анализа.** Чистым ферромагнетиком (ферромагнетик можно рассматривать как ферромагнетик с одной магнитной подрешеткой) мы будем в дальнейшем называть ферромагнетик, имеющий однородный физико-химический состав по всему его объему. Намагниченность насыщения такого ферромагнетика, имеющего температуру Кюри  $\theta$  и намагниченность насыщения  $I_{s0}(\theta)$  при  $T = 0$  К, в зависимости от температуры  $T$  обозначим как  $I_s(\theta, T)$ . Будем рассматривать  $I_s(\theta, T)$  как скалярную величину, знак которой определяет ориентацию  $I_s$  по или против выделенного направления [2]. Эта функция удовлетворяет следующим свойствам:

- а)  $I_s(\theta, 0) = I_{s0}(\theta)$ ;
  - б)  $I_s(\theta, T) = 0$  при  $T \geq \theta$ ;
  - в)  $I_s(\theta, T)$  — непрерывная и гладкая функция при  $T \leq \theta$ .
- (1)

Природные образцы имеют сложный физико-химический состав магнитной фракции. Каждая часть этой фракции характеризуется своей точкой Кюри  $\theta$  ( $\theta \in [\theta_{\min}, \theta_{\max}]$ , где  $\theta_{\min}$  и  $\theta_{\max}$  — минимальная и максимальная точки Кюри магнитной фракции образца), формой зависимости намагниченности от температуры  $I_s(\theta, T)$  и содержанием этой фракции в образце  $\varphi(\theta)$  (плотность распределения магнитных фаз). Функция  $\varphi(\theta)$  обладает свойствами:

- а)  $\varphi(\theta) = 0$  при  $\theta \leq \theta_{\min}$  и  $\theta \geq \theta_{\max}$ ;
- б)  $\varphi(\theta)$  — непрерывная и гладкая функция;
- в)  $\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \varphi(\theta) d\theta = 1$  — условие нормировки.

Полная намагниченность образца

$$I_s(T) = \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \varphi(\theta) I_s(\theta, T) d\theta,$$

в силу свойства (16) при  $T \geq \theta_{\min}$

$$I_s(T) = \int_T^{\theta_{\max}} \varphi(\theta) I_s(\theta, T) d\theta. \quad (2)$$

Выражение (2) — интегральное уравнение Вольтерра первого рода, несводимое к уравнению второго рода в силу свойства (16) функций  $I_s(\theta, T)$ . Для образцов горных пород изначально неизвестно, какой вид имеют функции  $I_s(\theta, T)$ . Более того, в настоящее время эти функции известны для ограниченного числа чистых ферромагнетиков и практически отсутствуют данные об этих функциях для реальных ферромагнитных минералов сложного состава, за исключением данных модельных расчетов для ограниченного круга ферромагнитных веществ, выполненных с определенными допущениями [2, 4, 6, 7].

Предположим, что ферромагнитная фракция образца представлена ферромагнетиками, имеющими температуры Кюри  $0 < \theta \leq \theta_{\max}$ . Пусть эти ферромагнетики обладают одинаковыми по форме зависимостями спонтанной намагниченности от температуры  $T$  вида

$$\frac{I_s(\theta, T)}{I_{s0}(\theta)} = F(T/\theta) \quad (3)$$

(назовем эту функцию опорной), где

- а)  $F(T/\theta)$  — непрерывная и гладкая функция при  $T \leq \theta$ ;
- б)  $F(T/\theta) = 0$  при  $T \geq \theta$ ;
- в)  $F(0/\theta) = 1$  при  $T = 0$  К.

Тогда выражение (2) будет эквивалентно:

$$I_s(T) = \int_T^{\theta_{\max}} \varphi(\theta) I_{s0}(\theta) F(T/\theta) d\theta. \quad (4)$$

Введем спектральную функцию  $S(\theta) = \varphi(\theta) I_{s0}(\theta)$ . Тогда (4) примет вид

$$I_s(T) = \int_T^{\theta_{\max}} S(\theta) F(T/\theta) d\theta. \quad (5)$$

Выражения (5), как и (2), — интегральное уравнение Вольтерра первого рода. Оставляя в стороне некорректность данной задачи (проблему устойчивости к входным данным), построим ее решение для спектральной функции  $S(\theta)$  ферромагнитного образца. Пусть  $T_i = T_0 + i\Delta T$ , где  $i = 0, 1, 2, \dots, N$  — экспериментальные точки наблюдения, а

$T_0 = T_{\min}$  и  $T_N = T_{\max}$  — границы рассматриваемого температурного интервала, причем  $I_s(T_{\max}) = 0$ ,  $\Delta T = \frac{T_N - T_0}{N}$ .

Введем дискретизацию по  $\theta$ :

$\theta_h = \theta_{\min} + h\Delta T$ , где  $h = 0, 1, 2, \dots, N$ .

Полагаем  $\theta_{\min} = T_{\min}$ ,  $\theta_{\max} = T_{\max}$ . Тогда получаем:

$$I_s(T_i) = I_i = \sum_{h=i+1}^N F_{ih} S_h, \quad (6)$$

где  $S_h = S(\theta_h)$ ,  $F_{ih} = F(T_i/\theta_h) \Delta T$ .

Из свойств функции  $F(T/\theta)$  и  $S(\theta) = \varphi(\theta) I_{s0}(\theta)$ :

1)  $S_0 = 0$ ,  $S_N = 0$ ,

2)  $F_{ih}$  — матрица:  $F_{ih} \neq 0$  при  $h = i+1, \dots, N-1$ ,  $F_{ih} = 0$  для любого  $h \leq i$ .

Поэтому (6) — система уравнений с квадратной верхней треугольной матрицей относительно  $S_1, \dots, S_{N-1}$ . Решение этой системы уравнений

$$S_h = \frac{I_{h-1} - \sum_{l=h+1}^{N-1} F_{h-1,l} S_l}{F_{h-1,h}}. \quad (7)$$

Вид спектральной функции  $S(\theta)$  зависит от выбора опорной функции  $F(T/\theta)$ . Естественно выбрать в качестве  $F(T/\theta)$  зависимость, отражающую реальное поведение спонтанной намагниченности от температуры каких-либо ферромагнетиков.

Простейшими функциями, наиболее близко описывающими зависимость спонтанной намагниченности от температуры таких ферромагнетиков, как магнетит, железо, никель и кобальт, являются функции вида [3]

$$\frac{I_s(\theta, T)}{I_{s0}(\theta)} = B_J \left( \frac{3J}{J+1} \frac{I_s(\theta, T)}{I_{s0}(\theta)} \frac{\theta}{T} \right), \quad (8)$$

где  $J$  — внутреннее квантовое число магнитных катионов, определяющих магнитные свойства ферромагнетика, а  $B_J(X)$  — функция Бриллюэна. Решение этого уравнения нам неизвестно, так как неизвестны ферромагнетики анализируемой горной породы.

В качестве нулевого приближения рассмотрим опорную функцию, по которой производится разложение термомагнитной кривой  $I_s(T)$ , в виде асимметричной единичной функции:

$$F(T/\theta) = U_+(1 - T/\theta) = \begin{cases} 1, & \text{при } T < \theta, \\ 0, & \text{при } T \geq \theta. \end{cases} \quad (9)$$

Тогда, учитывая свойства этой функции, имеем:

$$I_s(T) = \int_T^{\theta_{\max}} S(\theta) U_+(1 - T/\theta) d\theta = \int_T^{\theta_{\max}} S(\theta) d\theta, \quad \text{а } S(\theta) = - \left. \frac{dI_s(T)}{dT} \right|_{T=\theta} \quad (10)$$

Это соответствует результату, получаемому при дифференциальном термомагнитном анализе (ДТМА) [1], т.е. является частным случаем предлагаемой методики. Применение в спектральном термомагнитном анализе (СТМА) функции  $F'_\theta(T/\theta)$ , являющейся решением уравнения (8), в качестве опорной дает возможность более полно учесть физические свойства исследуемого вещества, в то время как модель (9) не отражает реальной зависимости спонтанной намагниченности от температуры.

Возможны два направления определения истинной опорной функции. Одно из направлений предполагает создание банка опорных функций и зависимостей  $I_s(\theta)$ , полученных путем прямых измерений всех чистых минералогических фаз, присутствие

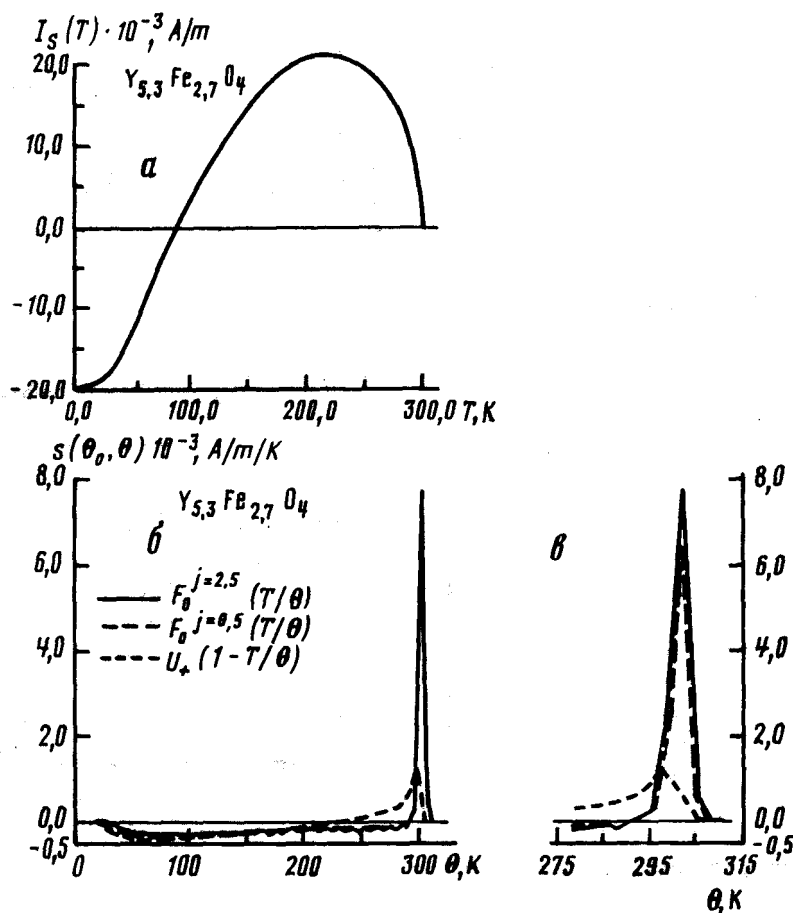


Рис. 1. Зависимость спонтанной намагниченности от температуры феррита-граната  $\text{Y}_{5.3}\text{Fe}_{2.7}\text{O}_{12}$  (а) и спектральные функции для различных опорных функций (б) и (в)

которых возможно в анализируемом образце. Во втором — производится сравнение спектров эталонов со спектрами изучаемых веществ, а как первое приближение к опорной функции используется модель (8).

Для реализации СТМА в соответствии со вторым направлением введем функцию  $s(\theta_0, \theta)$  в качестве спектральной линии чистого ферромагнетика с температурой Кюри  $\theta_0$  для опорной функции  $F_0^j$ . Тогда

$$I_s(\theta_0, T) = \int_0^{\theta_0} s(\theta_0, \theta) F_0^j(T/\theta) d\theta.$$

Выражение для спектральной функции  $S(\theta)$  ферромагнитного образца примет вид

$$S(\theta) = \int_{\theta}^{\theta_{\max}} \varphi(\theta_0) s(\theta_0, \theta) d\theta_0 \quad (11)$$

При интерпретации производится сравнение по форме экспериментального спектра  $S(\theta)$  с набором спектральных линий  $s(\theta_0, \theta)$ , полученных по неточной модели (3), аналогично классическому спектральному анализу.

Для расчета спектральных функций в Институте экспериментальной минералогии АН СССР была разработана программа "Спектральный термомагнитный анализ", ко-

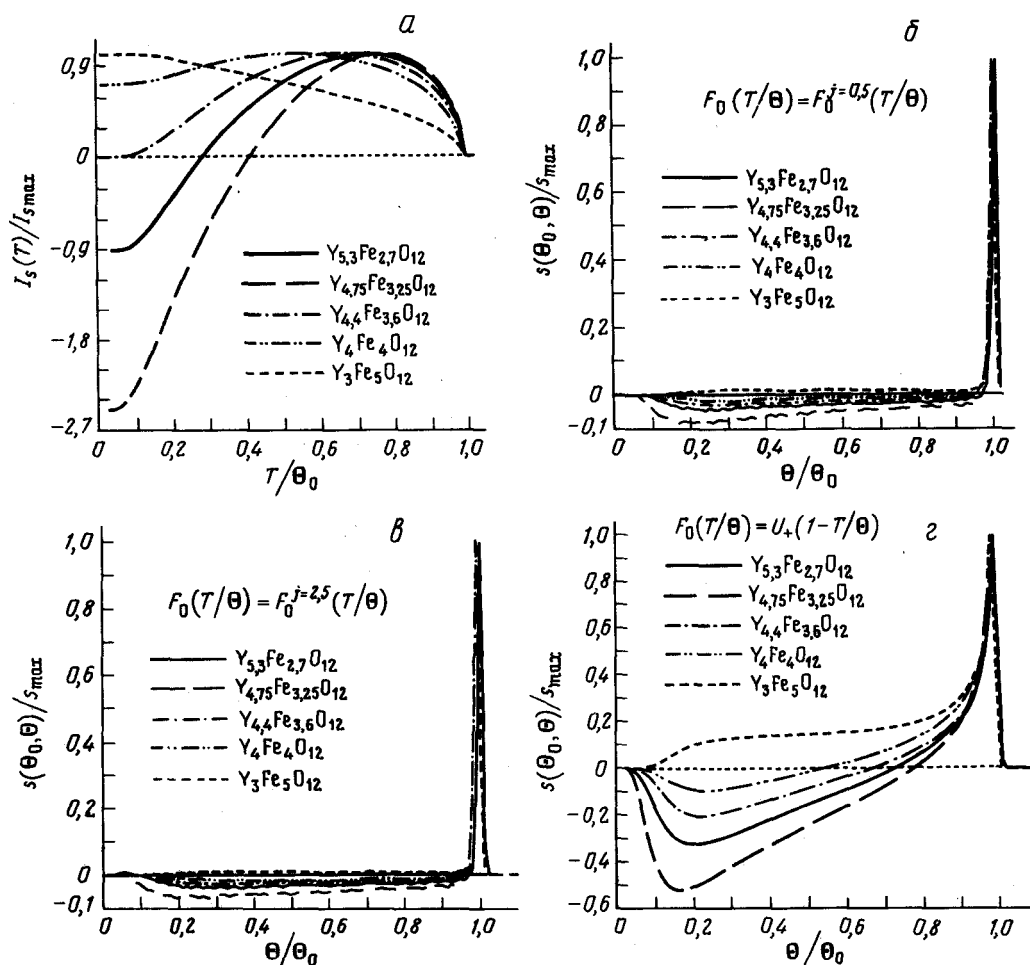


Рис. 2. Зависимости спонтанной намагниченности от температуры иттриевых ферритов-гранатов YIG (а), спектральные функции для опорных функций  $F_0^{j=0.5}(T/\theta)$  (б) и  $F_0^{j=2.5}(T/\theta)$  (в) и  $- \frac{dI_s(T)}{dT}$ , т.е. опорная функция  $U_+(1 - T/\theta)$  (г)

торая выполняет следующие операции: приведение исходных экспериментальных данных к единой температурной шкале, сглаживание методом сплайн-регрессии экспериментальных данных; расчет функции  $S(\theta)$  для заданных опорных функций  $F_0^j(T/\theta)$  (или любых других опорных функций) по алгоритму (7).

Программа позволяет изменять набор опорных функций и производить реконструкцию термомагнитных кривых по части спектральной функции  $S(\theta)$ .

**Применение методики спектрального термомагнитного анализа.** Рассмотрим результаты практического применения метода СТМА. Для проверки эффективности и достоверности метода он был применен к зависимостям спонтанной намагниченности  $I_s(T)$  двухподрешеточного феррита-граната иттрия  $Y_3 + 5x Fe_{5-5x} O_{12}$  (YIG), полученным расчетным путем (рис. 1, а и 2, а). При расчетах использовались данные, приведенные в работах [2, 4]. В табл. 1 приведены характеристики этих ферромагнетиков. Для модельных зависимостей  $I_s(T)$  были рассчитаны спектральные функции  $S(\theta)$ , которые в данном конкретном случае чистого ферромагнетика эквивалентны  $s(\theta_0, \theta)$ . В качестве опорных функций использовались зависимости (8) для  $J = 0,5$  (рис. 1, б, в и 2, б) и для  $J = 2,5$  (рис. 1, в, г и 2, в), так как ферромагнитные свойства YIG опреде-

Катионные распределения, намагниченности насыщения и температуры Кюри иттриевых ферритов-гранатов (расчетные данные)

| Состав                    | Катионное распределение |                     | $\theta$ , К | $I_s(\theta)$ , кА/м |
|---------------------------|-------------------------|---------------------|--------------|----------------------|
|                           | подрешетка A            | подрешетка D        |              |                      |
| $Y_{3,3}Fe_{2,7}O_{12}$   | $[Y_{0,6}Fe_{1,4}]$     | $(Y_{1,7}Fe_{1,3})$ | 302          | -19,6                |
| $Y_{4,75}Fe_{3,25}O_{12}$ | $[Y_{0,25}Fe_{1,75}]$   | $(Y_{1,5}Fe_{1,5})$ | 361          | -49,0                |
| $Y_{4,4}Fe_{3,6}O_{12}$   | $[Y_{0,2}Fe_{1,8}]$     | $(Y_{1,2}Fe_{1,6})$ | 406          | 0,0                  |
| $Y_4Fe_4O_{12}$           | $[Y_{0,1}Fe_{1,9}]$     | $(Y_{0,9}Fe_{2,1})$ | 456          | 39,2                 |
| $Y_3Fe_5O_{12}$           | $[Fe_2]$                | $(Fe_3)$            | 570          | 196,0                |

ляются катионами  $Fe^{+3}$ , для которых  $J = S = 2,5$ . Для сравнения были рассчитаны также зависимости  $dI_s(T)/dT$  (рис. 1, б и 2, з).

Из рисунков видно, что применение спектральной функции  $S(\theta)$  с опорной функцией  $F_0^{0,5}(T/\theta)$  дает более точное значение точки Кюри, чем метод ДТМА, так как функция  $S(\theta)$  имеет более отчетливый и узкий максимум при температуре Кюри, чем зависимость  $dI_s(T)/dT$ .

На рис. 3 и 4 приведены результаты СТМА (в качестве опорной функции использовалась функция  $F_0^{0,5}(T/\theta)$  и ДТМА образца железистых кварцитов Курской магнитной аномалии, ферритмагнитная фракция которого представлена в основном магнетитом  $Fe_3O_4$  (измерения зависимости  $I_s(T)$  производились в поле  $H = 206,9$  кА/м), и образца 2842/35 подводного базальта Азоро-Гибралтарского поднятия (зависимость  $I_s(T)$  получена в поле  $H = 51,7$  кА/м).

Экспериментальные результаты для природных образцов горных пород были получены на вибрационном терромагнитометре (намагничивающее поле  $H = 206,9$  кА/м) и автоматической терромагнитной установке (намагничивающее поле  $H$  до 51,7 кА/м, управление режимом эксперимента и запись результатов производятся персональной ЭВМ РС ХТ).

На спектре  $S(\theta)$  образца железистого кварцита КМА (рис. 3, б, сплошная линия), отмечаются острый, узкий пик при  $\theta = 851$  К, соответствующий температуре Кюри исследуемого образца, и характерный отрицательный пик при  $\theta = 150$  К, отражающий переход Вервея в магнетите. Небольшой отрицательный пик в районе температуры Кюри отражает отклонение терромагнитной кривой магнетита от модельной функции  $F_0^{0,5}(T/\theta)$ .

Спектральная функция  $S(\theta)$  образца 2842/35 (рис. 4, б, сплошная линия) показывает наличие двух точек Кюри (534 и 600 К), что можно объяснить присутствием в ферритмагнитной фракции титаномagnetита с  $\theta = 534$  К. Наличие максимума с температурой Кюри  $\theta = 600$  К, по-видимому, связано с наличием в образце однофазно-окисленного титаномagnetита. Более определенно об этом можно было бы сказать при наличии кривой охлаждения этого образца. Форма линии  $S(\theta)$  при  $T < 534$  К объясняется  $P$ -типом кривой  $I_s(T)$  по Неелю.

Дифференциальные терромагнитные кривые  $dI_s(T)/dT$  (рис. 3, б и 4, б, штриховые линии) менее детально отражают особенности терромагнитных зависимостей  $I_s(T)$  исследованных образцов и дают несколько иные значения температур фазовых переходов.

Метод СТМА был опробован при исследовании образцов траппов Мало-Ботуобинского района Якутской АССР (измерения зависимости  $I_s(T)$  производились в поле  $H = 206,9$  кА/м). Ферритмагнитная фракция этих образцов представлена титаномagnetитом, находящимся на различных стадиях распада твердого раствора и однофазного окисления, и ильменитом [5]. Для этих образцов методом рентгеноспектрального анализа (анализы выполнены в аналитической лаборатории ИЭМ АН СССР) был опреде-

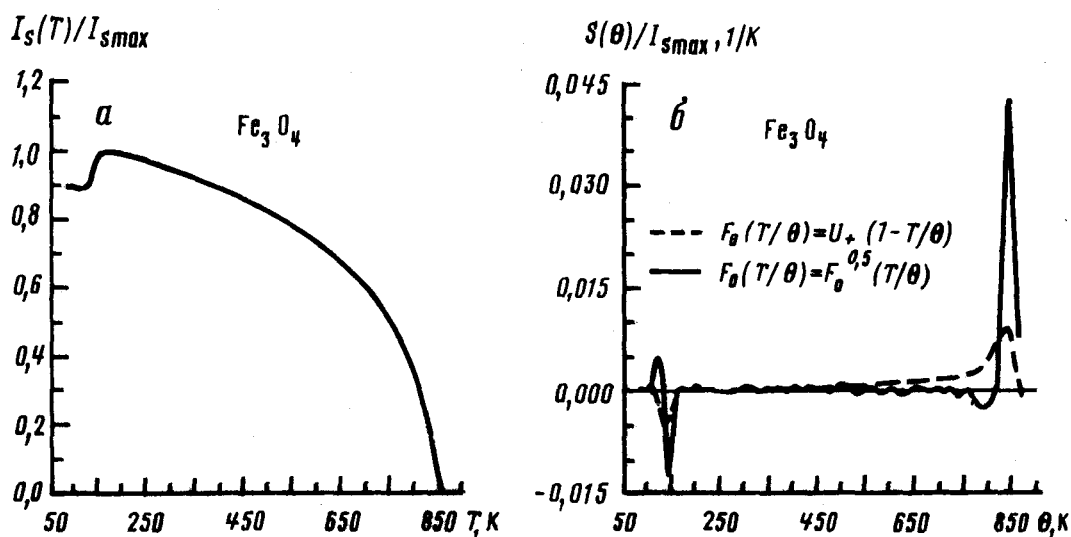


Рис. 3. Зависимость спонтанной намагниченности от температуры железистого кварцита КМА (а) и спектральные функции  $S(\theta)$  для различных опорных функций (б)

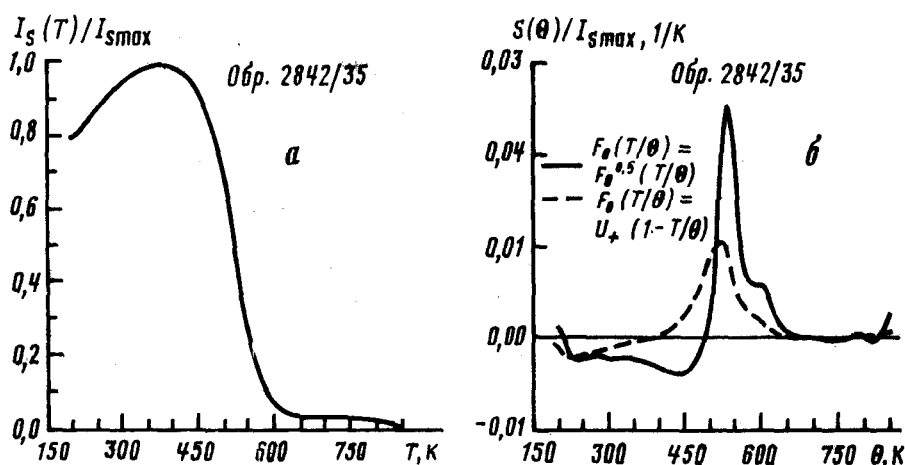


Рис. 4. Зависимость спонтанной намагниченности от температуры подводного базальта Азоро-Гибралтарского поднятия обр. 2742-35 (а) и спектральные функции  $S(\theta)$  для различных опорных функций (б)

лен химический состав титаномагнетита и рассчитаны по данным работы [3] точки Кюри (в табл. 2 приведены средние значения и стандартное отклонение по 10 измерениям для каждого образца).

Спектральный термомагнитный анализ (в качестве опорной использовалась функция  $F_0^{0.5}(T/\theta)$  этих образцов, рис. 5,б и 6,б) полностью отражает физико-химический состав исследуемых образцов. Так, на спектрах нагрева (сплошные линии) хорошо наблюдаются пики ильменита в области низких температур ( $\theta \approx 140$  К), титаномагнетита и на его фоне пики образовавшихся при распаде исходного твердого раствора высокотитанистого титаномагнетита ( $\theta \approx 320$  К) и магнетита с малым содержанием титана ( $\theta \approx 750$  К). Эти пики на спектрах охлаждения (штриховые линии) не отмечают-ся в связи с частичной гомогенизацией твердого раствора. Пики основной титаномаг-

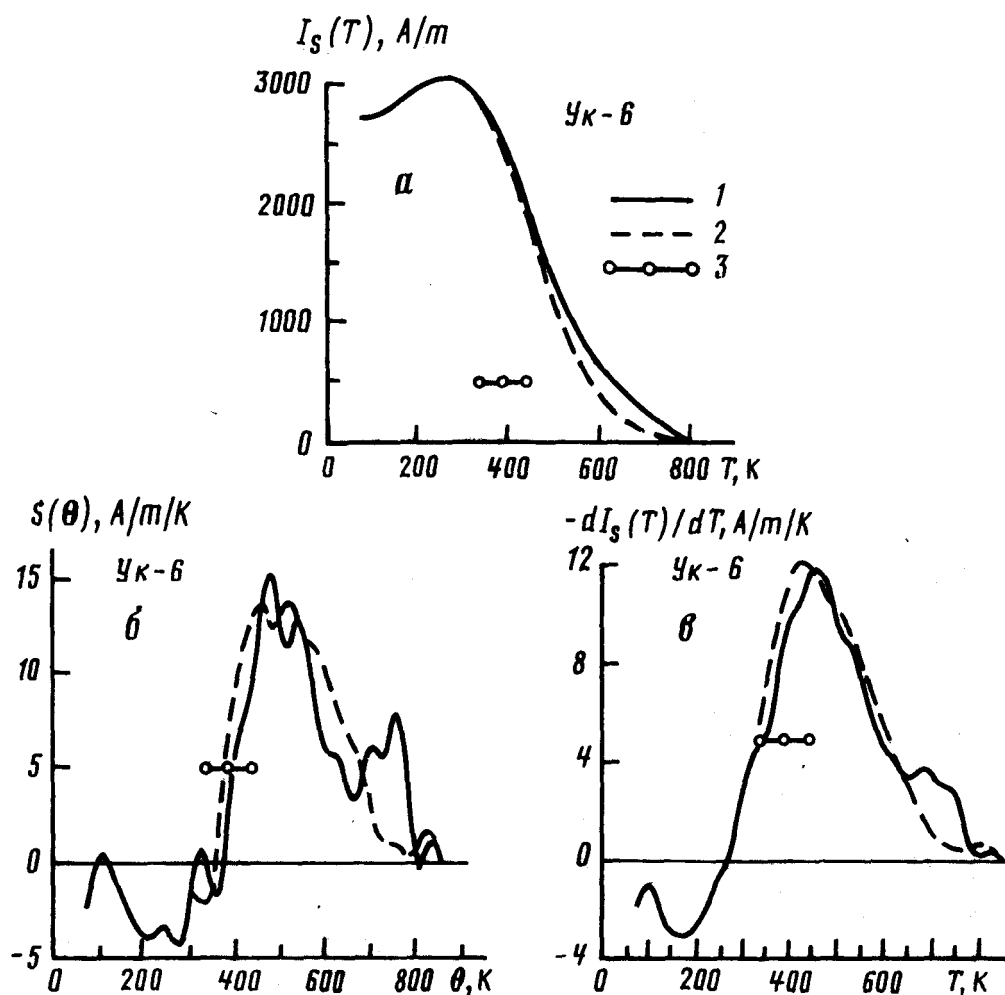


Рис. 5. Траппы Малоботуобинского района Якутской АССР. Образец Ук-6: зависимости спонтанной намагниченности (а), спектральные функции для  $F_0^{j=0,5}(T/\theta)$  (б) и дифференциальные кривые (в): 1 – нагрев, 2 – охлаждение, 3 – расчетные значения точек Кюри

нетитовой фазы на спектрах охлаждения становятся уже и интенсивнее, чем на спектрах нагрева, и смещаются в область более низких температур. Уширение пика основной титаномагнетитовой фазы образца Ук-6 на спектре охлаждения можно объяснить появлением менее титанистого титаномагнетита, образовавшегося в процессе нагрева из однофазно-окисленного титаномагнетита. Формы линий  $S(\theta)$  при температурах ниже температур пиков титаномагнетитовых фаз, так же как и у образца 2842/35, связаны с Р-типом кривых  $I_s(T)$ .

На дифференциальных кривых (рис. 5, в и 6, в), повторяющих в общих чертах спектральные функции исследуемых образцов, пики фаз, образовавшихся при распаде твердого раствора титаномагнетита, менее выражены, слабо различаются пики, связанные с однофазным окислением.

Отметим, что спектральные пики основной титаномагнетитовой фазы лежат правее расчетных диапазонов точек Кюри. Для объяснения этого расхождения по данным [3] была рассчитана зависимость от температуры Кюри спонтанной намагниченности при  $T = 0$  К титаномагнетита  $(1-x)\text{Fe}_2\text{O}_3x\text{Fe}_2\text{TiO}_4$  (рис. 7). Расчет показал, что зависи-



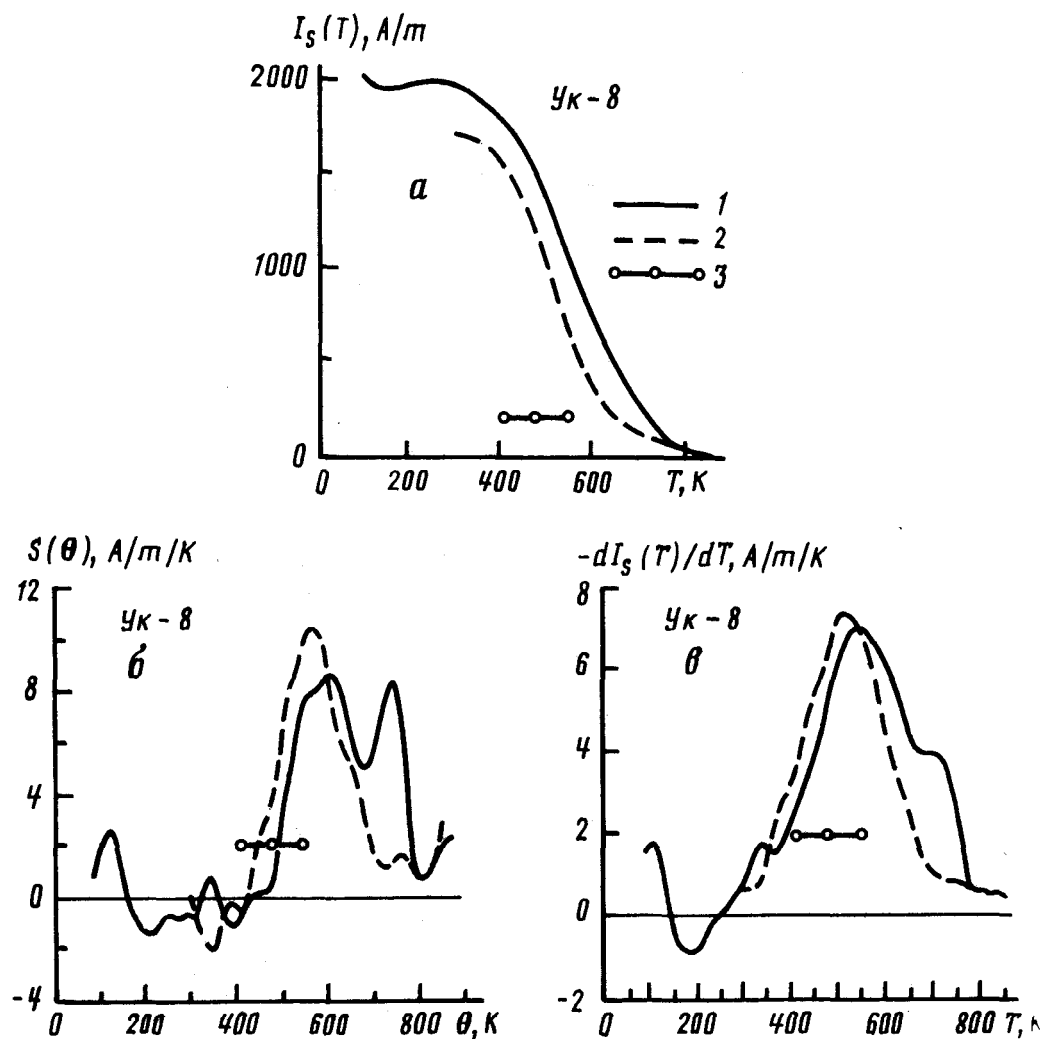


Рис. 6. Траппы Малоботуобинского района Якутской АССР. Образец Ук-8: зависимости спонтанной намагниченности (а), спектральные функции для  $F_0^{j=0,5}(T/\theta)$  (б) и дифференциальные кривые (в): 1 – нагрев, 2 – охлаждение, 3 – расчетные значения точек Кюри

Таблица 2

Результаты рентгеноспектрального анализа титаномагнетита образцов траппов Малоботуобинского района Якутской АССР (мол.%)

| Минералы            | Ук-6             | Ук-8              |
|---------------------|------------------|-------------------|
| $MgAl_2O_4$         | $3,04 \pm 0,52$  | $2,29 \pm 0,66$   |
| $Mn_2TiO_4$         | $0,87 \pm 0,25$  | $0,46 \pm 0,02$   |
| $Mg_2TiO_4$         | $0,35 \pm 0,23$  | $0,36 \pm 0,35$   |
| $FeCr_2O_4$         | $0,35 \pm 0,13$  | $0,36 \pm 0,16$   |
| $Fe_2TiO_4$         | $61,17 \pm 7,07$ | $49,29 \pm 10,33$ |
| $Fe_2O_4$           | $34,18 \pm 7,40$ | $47,15 \pm 10,41$ |
| Расчет $\theta$ , K | $390 \pm 50$     | $480 \pm 70$      |

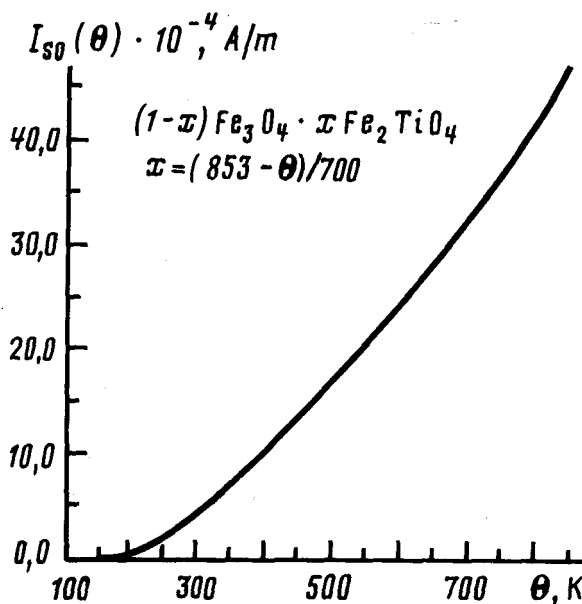


Рис. 7. Зависимость спонтанной намагниченности  $I_{s0}(\theta)$  при  $T = 0$  К титаномагнетита  $(1-x)\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot x\text{Fe}_2\text{TiO}_4$  от его температуры Кюри  $\theta$

мости  $I_s(T)$  титаномагнетита с содержанием ульвошпинели  $x > 0,5$  отличаются от опорной функции  $F_0^{0,5}(T/\theta)$ , что и приводит к несовпадению положения пиков  $S(\theta)$  с истинными значениями точек Кюри.

Заключение. Описанный метод спектрального терромагнитного анализа даёт возможность установить количество и типы минералогических ферромагнитных фаз в образце горной породы и в первом приближении вклад каждой фазы в суммарную  $I_s$ , а также, что, на наш взгляд, наиболее существенно, определить с достаточной высокой точностью значения точек Кюри всех фаз.

В связи с тем что предметом анализа является форма кривой  $I_s(T)$ , мы считаем, что предлагаемый метод может быть использован и для анализа химических изменений ферромагнитной фракции в процессе нагрева. Однако этот вопрос требует дополнительного исследования на соответствующих образцах горных пород и минералов. Метод может использоваться для анализа не только горных пород, но и других ферро- и ферромагнитных веществ.

#### Список литературы

1. Буров Б.В., Ясонов П.Г. Введение в дифференциальный терромагнитный анализ горных пород. Казань: Изд-во Казан, ун-та, 1979. 160 с.
2. Крупинка С. Физика ферритов и родственных им окислов. Т. 1. М.: Мир, 1978. 353 с.
3. Ногата Т. Магнетизм горных пород. М.: Мир, 1965. 348 с.
4. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. М.: Мир, 1987. 419 с.
5. Трухин В.И., Жилева В.А., Зинчук Н.Н. и др. Магнетизм кимберлитов и траппов. М.: Изд-во МГУ, 1989. 165 с.
6. Schult A. On the strength of exchange interactions in titanomagnetites and its relation to self-reversal of magnetization//Z. Geophysik. 1971. B. 37. S. 357-365.
7. Stephenson A. Spontaneous magnetization curves and Curie points of spinels containing two types of magnetic ion//Philos. Mag. 1972. V. 25. №5. P. 1213-1233.

Поступила в редакцию  
7.08.91

МГУ им. М.В. Ломоносова  
Физический факультет  
ИЭМ РАН