

О ТЕРМОМАГНИТНОМ КРИТЕРИИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ

©2001г. В. П. Щербаков, В. В. Щербакова, Ю. К. Виноградов

Геофизическая обсерватория "Борок" ОИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН, пос. Борок Ярославской обл.

Поступила в редакцию 17.01.2000 г.

Корректное определение палеонапряженности и проведение палеотектонических и магнитостратиграфических построений на изверженных породах возможно только при выполнении законов Телье независимости и аддитивности рTRM, которые строго соблюдаются лишь на образцах с однодоменным (ОД) размером зерен. Известный термомангнитный критерий (ТК) Большакова-Щербаковой определения доменной структуры основан на измерении величины хвоста рTRM. Однако нагрев образца до T_c , необходимый для разрушения его NRM, часто вызывает значительные изменения в минералогии и структуре ферромагнитных зерен, что существенно снижает практическую значимость ТК. Возможный способ избежать нагрева - разрушить NRM действием переменного магнитного поля убывающей амплитуды, т.е. создать рTRM из нулевого состояния (НС). В работе выполнено сравнение эффективности ТК при создании рTRM из различных магнитных состояний. Показано, что хвост рTRM, полученной из НС, втрое меньше хвоста рTRM, полученного при стандартном применении ТК. Для практики палеомагнетизма это означает, что использование в ТК рTRM, созданной из НС, пригодно лишь для грубой селекции многодоменных МД образцов.

При определении палеонапряженности $H_{др}$ и проведении палеотектонических и магнитостратиграфических построений часто используются изверженные породы, несущие термоостаточную (TRM) намагниченность. При этом палеонаправления определяются по диаграммам Зийдервильда, которые строятся по результатам последовательной термочистки исследуемых образцов, а палеонапряженность - по методу Телье. Заметим, что проведение этих процедур предполагает справедливость законов Телье независимости и аддитивности парциальных TRM (рTRM) изучаемых пород. Однако, как свидетельствуют многочисленные экспериментальные данные, полученные на образцах с различной доменной структурой (ДС), эти законы выполняются только на образцах с однодоменным (ОД) размером зерен. Детальное обсуждение этой проблемы имеется в работе [Щербакова и др., 1998]. Поэтому представляется насущно необходимым иметь для палеомагнитной практики надежные критерии оценки ДС образцов с целью их предварительного отбора.

В литературе известен целый комплекс критериев подобного рода, подробное их изложение можно найти в [Щербаков, Щербакова, 1980]. Для термонамагниченных пород наиболее эффективным среди них является термомангнитный критерий (ТК) [Большаков, Щербакова, 1979], поскольку он имеет дело именно с магнитной фракцией образца - носителем TRM. Пусть рTRM(T_1, T_2) есть рTRM, созданная при охлаждении образца от точки Кюри T_c в магнитном поле H , включенном в температурном интервале (T_1, T_2), $T_1 > T_2$, где T_1

и T_2 - верхняя и нижняя температуры интервала создания намагниченности соответственно. Шашканов и Металлова [1972] обратили внимание на то, что, в противоречии с законом Телье независимости рTRM, рTRM(T_1, T_2) не всегда полностью разрушается при нагреве образца в нулевом поле до температуры T_1 . Большаков и Щербакова [1979] ввели для неразрушающегося остатка термин "хвост рTRM". Согласно ТК, хвост практически отсутствует у ОД, но тянется при терморазмагничивании до T_c у многодоменных (МД) зерен. У псевдооднодоменных (ПОД) частиц относительная величина хвоста существенно меньше, чем у МД, и исчезает он в процессе терморазмагничивания при промежуточных температурах $T_1 < T < T_c$.

Напомним, что рTRM могут различаться способом их создания [Виноградов, Марков, 1989]. При охлаждении образца в нулевом поле "сверху" от T_c до T_1 , где в интервале (T_1, T_2) включается поле, получается так называемая рTRM_{свх}(T_1, T_2). При создании рTRM_{снз}(T_1, T_2) образец при $H = 0$ сначала нагревается до T_c и затем охлаждается до комнатной температуры T_0 , т.е. приводится в абсолютно нулевое состояние (АНС), после чего нагревается "снизу" до T_1 , где включается поле, и образец охлаждается. Виноградов и Марков [1989] нашли, что в МД образцах рTRM_{свх}(T_1, T_2) > рTRM_{снз}(T_1, T_2), т.е. величина рTRM(T_1, T_2) зависит от температурной предыстории образца.

Пусть tail[рTRM(T_1, T_2)] означает остаток рTRM(T_1, T_2) после ее частичного терморазмагничивания путем нагрева образца в нулевом поле до

T_1 и последующего охлаждения до комнатной температуры T_0 . Возвращаясь к вопросу о критериях, отметим, что Щербакова и др. [1998] модифицировали ТК, заменив качественную оценку типа ДС использованием количественного параметра

$$A_{\text{свх}}(T_1, T_2) = \text{tail}[p\text{TRM}_{\text{свх}}(T_1, T_2)]/p\text{TRM}_{\text{свх}}(T_1, T_2), (1)$$

где все величины измерены при T_0 . Согласно [Щербакова и др., 1998], $A_{\text{свх}}(T_1, T_2) < 5\%$ соответствует ОД (или близкому к ОД), $5\% < A_{\text{свх}}(T_1, T_2) < 15\%$ – ПОД и $A_{\text{свх}}(T_1, T_2) > 15\%$ – МД поведению $p\text{TRM}_{\text{свх}}(T_1, T_2)$.

В этой же работе была найдена определенная зависимость между величиной параметра $A_{\text{свх}}(300, T_0)$ и ошибкой определения палеонапряженности по низкотемпературной части диаграммы Арай–Нагата: чем больше $A_{\text{свх}}(300, T_0)$, тем больше определяемая величина поля отличается от его истинного значения, использованного в эксперименте. При этом неравенство $A_{\text{свх}}(300, T_0) < (5-10)\%$ свидетельствует о возможной пригодности данного образца для работы по методике Телье, и наоборот. Заметим, что проведение этого теста не требует наличия какой-либо дополнительной аппаратуры, кроме печи нагрева и измерительного прибора. Однако нагрев образца до T_c , необходимый для создания $p\text{TRM}_{\text{свх}}(300, T_0)$, часто вызывает химические изменения состава ферромагнитных зерен, и это существенно снижает практическую значимость предлагаемого теста. Дело не поправит использование в неравенстве, указанном выше, параметра $A_{\text{снз}}(300, T_0)$ вместо $A_{\text{свх}}(300, T_0)$, поскольку и в этом случае необходим предварительный прогрев образца до T_c для его приведения в АНС.

Возможный способ избежать нагрева – разрушить природную остаточную намагниченность образца действием переменного магнитного поля убывающей амплитуды, т.е. создать $p\text{TRM}(300, T_0)$ из нулевого состояния (НС), и уже эту намагниченность использовать как опорную для тестирования ДС образцов. Обозначим такую намагниченность как $p\text{TRM}_{\text{нс}}(300, T_0)$. Для обоснования этой методики необходимо провести детальное изучение свойств $p\text{TRM}_{\text{нс}}(300, T_2)$, сравнить их со свойствами $p\text{TRM}_{\text{свх}}(300, T_2)$ и $p\text{TRM}_{\text{снз}}(300, T_2)$ и, в частности, сравнить численные значения параметра

$$\begin{aligned} A_{\text{нс}}(300, T_0) &= \\ &= \text{tail}[p\text{TRM}_{\text{нс}}(300, T_0)]/p\text{TRM}_{\text{нс}}(300, T_0) \end{aligned} \quad (2)$$

с аналогичными величинами $A_{\text{свх}}(300, T_0)$ и

$$\begin{aligned} A_{\text{снз}}(300, T_0) &= \\ &= \text{tail}[p\text{TRM}_{\text{снз}}(300, T_0)]/p\text{TRM}_{\text{снз}}(300, T_0) \end{aligned} \quad (3)$$

для одного и того же образца. Такое исследование и является целью настоящей работы.

Для экспериментов использовался термоманометр с вращающимся образцом конструкции Буракова–Виноградова, цена деления которого составляет 2×10^{-3} А/м. Прибор позволяет создавать $p\text{TRM}$ в любом температурном интервале от T_0 до 750°C и фиксировать температурную зависимость величины остаточной намагниченности после выключения поля. Управление экспериментом и вывод данных полностью компьютеризированы. В опытах использовались естественные образцы изверженных горных пород с различной ДС, которая менялась от образца к образцу от ОД до МД, и несколько искусственных. Подробное описание этих образцов дано в [Щербакова и др., 1998]. Оценка ДС производилась как по ТК, так и по параметру $A_{\text{свх}}(300, T_0)$. В коллекции только один – образец 16 – был ОД со значением параметра $A_{\text{свх}}(300, T_0) < 1\%$, остальные относятся к ПОД и МД.

Для получения численных значений параметров $A_{\text{свх}}(300, T_0)$, $A_{\text{снз}}(300, T_0)$ и $A_{\text{нс}}(300, T_0)$ на каждом из образцов выполнялась одна и та же процедура: в поле 80 А/м в образцах последовательно создавались и измерялись при T_0 $p\text{TRM}_{\text{свх}}(300, T_0)$, $p\text{TRM}_{\text{снз}}(300, T_0)$ и $p\text{TRM}_{\text{нс}}(300, T_0)$. Каждая из созданных $p\text{TRM}$ частично разрушалась при нагреве образца в нулевом поле до 300°C и последующем охлаждении до T_0 , где замерялся остаток намагниченности $= \text{tail}[p\text{TRM}(300, T_0)]$. Примеры термокривых, полученных в результате этой процедуры, показаны на рис. 1а (образец 7b) и рис. 1б (образец 327) сплошными линиями. Для полноты картины каждая из исследуемых $p\text{TRM}$ создавалась вторично, и снималась кривая ее полного терморазмагничивания при нагреве образца до T_c (пунктирные линии).

На рис. 2а и 2б представлены диаграммы $A_{\text{свх}}(300, T_0) - A_{\text{снз}}(300, T_0)$ и $A_{\text{свх}}(300, T_0) - A_{\text{нс}}(300, T_0)$ соответственно. Распределение точек на диаграмме 2а можно грубо аппроксимировать прямой линией, проходящей через начало координат с тангенсом угла наклона $k = 0.46$, т.е. в среднем хвосты $p\text{TRM}_{\text{снз}}(300, T_0)$, замеренные при T_0 , в два раза меньше хвостов $p\text{TRM}_{\text{свх}}(300, T_0)$. Аналогично, распределение точек на диаграмме 2б аппроксимируется прямой линией с тангенсом угла наклона $k = 0.34$. Обращает на себя внимание то, что на этой диаграмме репрезентативные точки ПОД образцов располагаются кластером [$5\% < A_{\text{свх}}(300, T_0) < 15\%$, $2\% < A_{\text{нс}}(300, T_0) < 5\%$]. В целом из приведенных диаграмм можно вывести следующее соотношение:

$$\begin{aligned} \text{tail}[p\text{TRM}_{\text{свх}}(300, T_0)] &\approx \\ &\approx 2 \text{tail}[p\text{TRM}_{\text{снз}}(300, T_0)] \approx \\ &\approx 3 \text{tail}[p\text{TRM}_{\text{нс}}(300, T_0)]. \end{aligned} \quad (4)$$

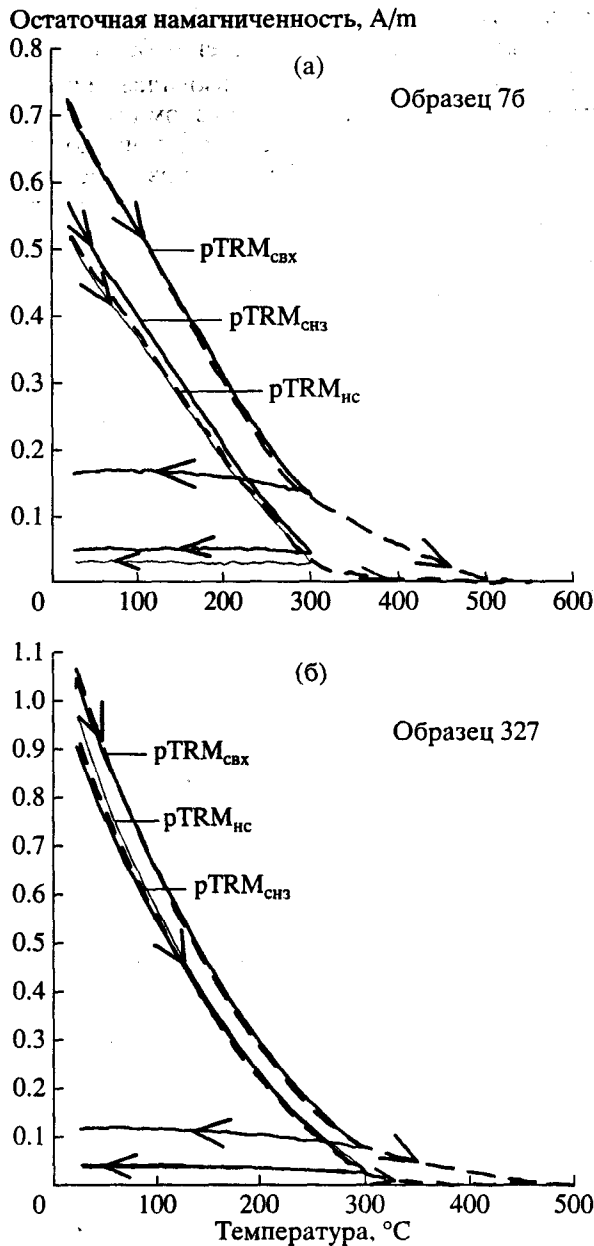


Рис. 1. Изменение с температурой $rTRM_{cbx}(300, T_0)$, $rTRM_{chz}(300, T_0)$ и $rTRM_{nc}(300, T_0)$ (сплошные линии) в процессе следующей процедуры: нагрев образца от T_0 до 300°C с последующим охлаждением до T_0 . Пунктирные линии представляют кривые непрерывного терморазмагничивания $rTRM_{cbx}(300, T_0)$ и $rTRM_{nc}(300, T_0)$. На рисунках указаны номера образцов, стрелками показан ход изменения температуры.

Кроме того, из всей совокупности наших данных следует, что на большинстве образцов прослеживается сходная иерархия и между величинами изучаемых $rTRM$:

$$rTRM_{cbx}(300, T_0) \geq rTRM_{chz}(300, T_0) \geq rTRM_{nc}(300, T_0). \quad (5)$$

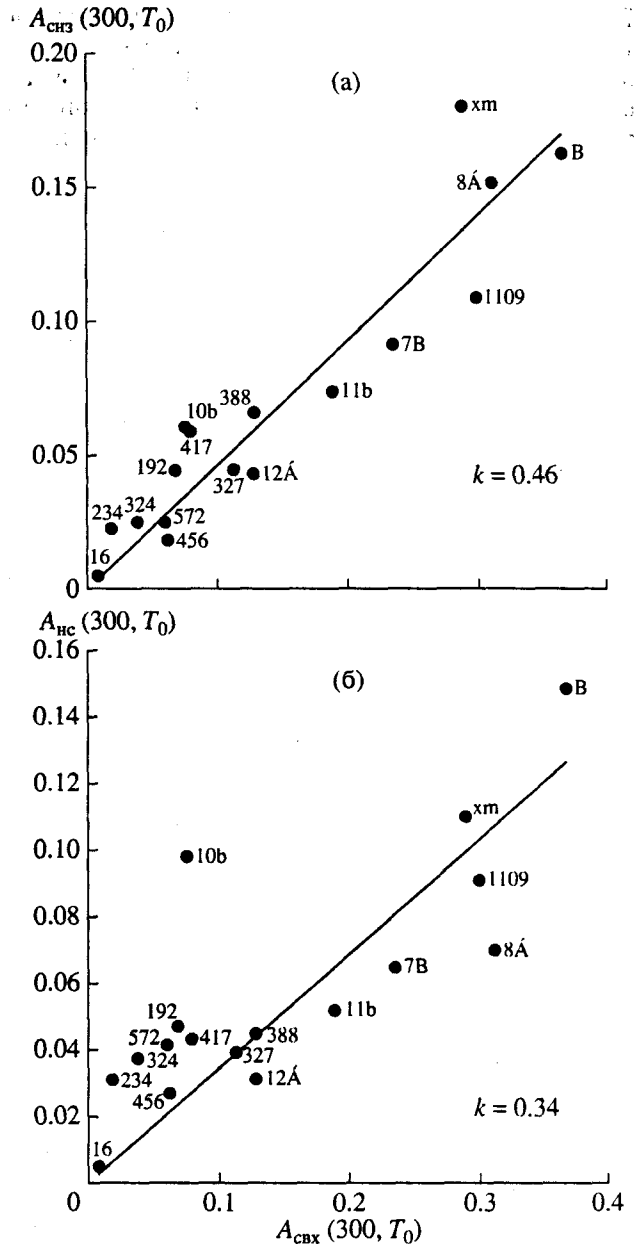


Рис. 2. Диаграммы $[A_{cbx}(300, T_0), A_{chz}(300, T_0)]$ (а) и $[A_{cbx}(300, T_0), A_{nc}(300, T_0)]$ (б). На графиках приведены линии и тангенсы угла наклона k линейной регрессии. Цифры у точек обозначают номера образцов.

При этом знак равенства характерен для ОД и иногда для ПОД зерен, в то время как для МД зерен всегда $rTRM_{chz}(300, T_0) > rTRM_{nc}(300, T_0)$. Иллюстрацию последнего утверждения можно видеть на рис. 1а, 1б. Более подробно соотношение между величинами $rTRM_{cbx}(300, T_0)$ и $rTRM_{chz}(300, T_0)$ обсуждается в [Щербакова и др., 1998]. В отдельных случаях наблюдается обратное соотношение величин $rTRM_{chz}(300, T_0)$ и $rTRM_{nc}(300, T_0)$ (образец 327, рис. 1б, сплошные линии), но различие в начальных значениях этих двух $rTRM$ невелико и быстро исчезает: кривые терморазмагничивания

этих $rTRM$ выше 150°C становятся практически неразличимы. Скорее всего, первоначальное различие этих кривых обусловлено случайными факторами, которых невозможно избежать при проведении экспериментов подобного рода.

Как и следовало ожидать, свойства исследуемых трех типов $rTRM$ зависят от ДС образца, которую можно характеризовать параметром $A_{свх}(300, T_0)$. (Значения этого параметра для всех исследованных образцов отложены на оси абсцисс на рис. 2а, рис. 2б). У ОД образца 16 все три типа $rTRM$ практически неразличимы. Из сравнения кривых полного терморазмагничивания $rTRM_{свх}(300, T_0)$ и $rTRM_{нс}(300, T_0)$ (рис. 1а, рис. 1б, пунктирные линии) можно сделать важный вывод о том, что хвосты $rTRM_{нс}(300, T_0)$ разрушаются при нагреве значительно быстрее, нежели хвосты $rTRM_{свх}(300, T_0)$. Указанная разница в ряде случаев настолько значительна, что образцы МД по традиционному ТК можно классифицировать лишь как ПОД, если при определении ДС руководствоваться поведением $rTRM_{нс}(300, T_0)$ (рис. 1а), а ПОД частицы могут выглядеть почти как ОД (рис. 1б). Иными словами, у одного и того же образца $rTRM_{свх}(300, T_0)$ и $rTRM_{нс}(300, T_0)$ при терморазмагничивании часто проявляют более “малоомное” поведение в сравнении с $rTRM_{свх}(300, T_0)$.

Для практики палеомагнетизма основной вывод настоящей работы сводится к тому, что использование параметра $A_{нс}(300, T_0)$ для идентификации ДС и, соответственно, для предварительного отбора образцов с целью определения по ним палеонапряженности представляется мало эффективным в силу малости численных значений этого параметра для ПОД и ОД образцов. Правда, с его помощью можно отделить чисто МД образцы, для которых $A_{нс}(300, T_0) > 5\%$ (рис. 2а). При значениях $2\% < A_{нс}(300, T_0) < 5\%$ образец, с большей долей вероятности, можно отнести к ПОД, при $A_{нс}(300, T_0) < 2\%$ образец, скорее всего, является ОД. Однако применение этих соотношений на практике требует измерения величин хвостов $rTRM_{нс}(300, T_0)$ при T_0 с высокой точностью, которая во многих случаях вряд ли достижима, особенно при учете даже небольших физико-химических изменений в ферромагнитных зернах исследуемых образцов при нагреве до 300°C .

С точки зрения теории неравенство (5) означает, что наиболее стабильным (т.е. наиболее устойчивым к воздействию внешнего поля) по отношению к созданию $rTRM$ является НС. Весьма близким к нему по стабильности представляется АНС, и оба эти состояния заметно отличаются от того, которое получается после нагрева образца до T_c и охлаждения до T_1 в нулевом поле – перед созданием $rTRM_{свх}$. Последнее состояние является наименее жестким, т.е. самым метастабильным, поскольку в образовании $rTRM_{свх}$

участвует большая доля магнитной фракции образца, чем при создании $rTRM_{снз}$ и $rTRM_{нс}$. Эта метастабильность $rTRM_{свх}$ находится в видимом противоречии с ее кажущейся большей устойчивостью к терморазмагничиванию – напомним, что хвост $rTRM_{свх}(300, T_0)$ разрушается существенно выше по температуре, чем хвосты у $rTRM_{снз}(300, T_0)$ и $rTRM_{нс}(300, T_0)$. В действительности, само по себе возникновение “длинных” хвостов $rTRM_{свх}$ обусловлено как раз большей метастабильностью этой $rTRM$. Дело в том, что ДС, возникающая непосредственно ниже T_c при охлаждении МД образца от этой температуры, является метастабильной и при дальнейшем охлаждении испытывает существенную перестройку [Большаков и др., 1983; McClelland and Sugiura, 1987; Шолпо и др., 1993; Shcherbakov et al., 1993], что подтверждается прямыми наблюдениями фигур Биттера–Акулова в зернах магнетита размером от 2 мкм и выше [Halgedahl, 1991; Heider et al., 1988; Heider, 1990]. Как следствие, часть МД зерен (или их отдельные области) переходят в состояние с меньшей энергией, т.е. стабилизируются, так что в результате блокирующие температуры зерен возрастают до величин, близких к T_c , что и приводит к возникновению “длинных” хвостов $rTRM_{свх}$.

Изложенные результаты согласуются с концепцией относительной стабильности состояний АНС и НС, согласно которой АНС метастабильно по сравнению с НС [Белоконь и др., 1973]. Однако из наших результатов следует, что это заключение справедливо только для МД образцов, в то время как в случае ПОД и тем более ОД частиц АНС эквивалентно НС – по отношению к свойствам $rTRM$, создаваемых из этих состояний.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 00-05-64008.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белоконь В.И., Кочегура В.В., Шолпо Л.Е. Методы палеомагнитных исследований горных пород. Л.: Недра. 1973. С. 247.
- Большаков А.С., Щербакова В.В. Термомагнитный критерий определения доменной структуры ферромагнетиков // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1979. №2. С. 38–7.
- Виноградов Ю.К., Марков Г.П. О влиянии вторичного низкотемпературного прогрева на магнитное состояние многодоменного магнетита. Исследования в области палеомагнетизма и магнетизма горных пород. М.: Наука. 1989. С. 31–39.
- Марков Г.П., Щербаков В.П., Большаков А.С., Виноградов Ю.К. О температурной зависимости парциальной термоостаточной намагниченности многодоменных зерен // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1983. № 8. С. 59–66.
- Шашканов В.А., Металлова В.В. Нарушение закона Телье для парциальных термоостаточных намагни-

ченностей // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1972.

№ 3. С. 86. Т. 1. № 1.

Шолто Л.Е., Иванов В.А., Борисова Г.Л. Терромагнитные эффекты перестройки доменной структуры // Изв. ДН СССР. Сер. Физика Земли. 1991. № 7. С. 119-127.

Щербаков В.П., Щербакова В.В. Критерии идентификации доменной структуры ферромагнитных зерен в минералах горных пород. Решение геофизических задач геомагнитными методами. М.: Наука. 1980. С. 136—148.

Щербакова В.В., Щербаков В.П., Виноградов Ю. К., Хайдер Ф. О свойствах рTRM многодоменных и псевдооднодоменных зерен и о применимости в этих случаях методики Телье определения палеонапряженности. "ВЕСТНИК ОГГГН РАН" электронный научно-информационный журнал. http://www.scgis.ru/russian/cp_125_1/h_dgggms/4-98/tcherbakov.htm.

Halgedahl, S.L. Magnetic domain patterns observed on synthetic Ti-rich titanomagnetite as a function of temperature and in states of TRM // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. P. 943-972

Heider F., Halgedahl S.L., and Dunlop D.J. Temperature dependence of magnetic domains in magnetite crystals // J. Geophys. Res. Lett. 1988. V. 5. P. 499-502.

Heider F. Temperature dependence of domain structure in natural magnetite and its significance for multidomain TRM models // Phys. Earth. Planet. Inter. 1990. V. 65. P. 54-61.

McClelland E. and N. Sugiura. A kinematic model of TRM acquisition in multidomain magnetite. Phys. Earth Planet. Inter. 1987. V. 46. P. 9-23.

Shcherbakov V.P., McClelland E., Shcherbakov V.V. A model of multidomain thermoremanent magnetization incorporating temperature-variable domain structure // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. P. 6201-6216.