

УДК 530.382.3

О ЗАВИСИМОСТИ ОШИБОК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАЛЕОНАПРАВЛЕНИЙ ОТ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ ФЕРРИМАГНИТНЫХ ЗЕРЕН ГОРНЫХ ПОРОД

© 2002 г. В. П. Щербаков, В. В. Щербакова

Геофизическая Обсерватория "Борок" ОИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН

Поступила в редакцию 14.12.2001 г.

На коллекции из 17 природных и 2 искусственных образцов, содержащих зерна с различной доменной структурой (ДС): однодоменной (ОД), псевдооднодоменной (ПОД) и многодоменной (МД), проведено экспериментальное моделирование процесса пошаговой термочистки с целью выявления возможных ошибок определения палеонаправлений. Для моделирования на образцах искусственно создавалась двух- или многокомпонентная термоостаточная намагниченность (TRM) с заданным по отношению друг к другу направлением компонент (в большинстве случаев это были 2 взаимно перпендикулярные компоненты). Показано, что на ПОД и МД образцах ошибки dJ_x , dJ_y в определении направления компонент, действительно, возникают; величина их меняется от 4° для ПОД (близких к ОД) образцов до 42° для МД. Найдена корреляция величины ошибки dJ_x с относительной величиной хвоста $pTRM$ - так называемым параметром $A_{\text{св}}$ (T_c/T_2), характеризующей ДС. Причина возникновения ошибки определения "палеополюсов" аналогична причине, вызывающей ошибку определения палеонапряженности, и заключается в нарушении законов Телье независимости и аддитивности $pTRM$ в ПОД и МД зернах.

ВВЕДЕНИЕ

Изверженные породы, у которых природная остаточная намагниченность (NRM) является термоостаточной (TRM) по своему происхождению, широко используются в палеомагнетизме для определения величины древнего магнитного поля $H_{\text{др}}$ и положений палеополюсов, необходимых при палеотектонических и магнитостратиграфических построениях. Наиболее надежным методом определения $J_{\text{др}}$ считается метод Телье, а значения палеополюсов получаются по результатам последовательной термочистки исследуемых образцов.

С физической точки зрения, применение обеих процедур - метода Телье и термочистки - предполагает, что на изучаемых породах выполняются законы Телье независимости и аддитивности парциальных TRM ($pTRM$). Но целый комплекс экспериментальных данных, полученных разными авторами при исследовании образцов с различной доменной структурой (ДС), свидетельствует о том, что эти законы выполняются только на образцах с однодоменным (ОД) размером зерен. На образцах с многодоменным (МД) и псевдооднодоменным (ПОД) размером частиц в поведении $pTRM$ прослеживается ряд характерных особенностей, которые противоречат законам Телье для $pTRM$ [Щербакова и др., 1998] и, как следствие, могут вести к ошибочным палеомагнитным результатам.

Действительно, определенно показано, что имеется влияние ДС образцов на результаты оп-

ределения палеонапряженности методом Телье [Levi, 1977; Большаков, Щербакова, 1979; Щербакова и др., 1998; Shcherbakov, Shcherbakova, 2001]. Из экспериментов, моделирующих процедуру Телье в лабораторном поле на образцах с различной доменной структурой, следует, что величина поля часто определяется с ошибкой, зависящей от типа ДС исследуемого образца. В частности, на природных образцах с заведомо МД поведением $pTRM$ ошибка в определении $H_{\text{др}}$ достигает (30-40)%, что делает актуальной проблему отбраковки МД образцов из исследуемых коллекций.

С другой стороны, остаточная намагниченность природных образцов часто имеет не одну, а две или более компонент, которые направлены по отношению друг к другу под какими-то углами. Причины многокомпонентности NRM могут быть разными. Особый интерес для практики палеомагнетизма представляют следующие случаи: 1) если остывание геологического тела от точки Кюри T_c до температуры окружающей среды (комнатной) T_0 происходило очень медленно, то во время этого процесса могло меняться направление внешнего магнитного поля, в котором порода остывала; 2) изверженные породы после остывания до T_0 претерпели вторичный разогрев до умеренных температур $T < T_c$ и последующее остывание, во время которого направление поля было другим, чем при их первичном остывании от точки Кюри. В обоих случаях по результатам термочистки обнаруживается неоднокомпонентность остаточной намагниченности.

Логично предположить, что, как и в ситуации с определением величины $H_{др}$ методом Телье, ДС образцов может сказываться на результатах определения положения палеополлюсов. К настоящему времени какие-либо экспериментальные данные на этот счет в литературе отсутствуют. Заполнить этот пробел, а именно – проследить, какие “палеонаправления” обнаруживаются на диаграммах Зийдервельда, построенных по результатам термочистки образцов с различной ДС и искусственно созданной в них двух- или многокомпонентной TRM , когда заданный между компонентами угол заранее известен, – является целью настоящей работы.

ОПИСАНИЕ ОБРАЗЦОВ И ПРИБОРОВ

Для проведения модельных экспериментов подобного рода прежде всего необходим набор образцов, которые имеют различную доменную структуру и стабильны к нагревам.

В литературе известен целый ряд критериев, помогающих оценить ДС образца без непосредственных визуальных ее наблюдений [Щербаков, Щербакова, 1980]. Но, как показывает практика, эти критерии лучше использовать в комплексе. Добавим также, что для термонамагниченных пород, которые нас сейчас интересуют, наиболее предпочтительным представляется терромагнитный критерий (ТК) [Большаков, Щербакова, 1979], поскольку он имеет дело именно с магнитной фракцией образца – носителем TRM . Напомним, что ТК базируется на проверке справедливости закона Телье независимости $pTRM$, согласно которому $pTRM(T_1, T_2)$ должна полностью разрушаться при нагреве образца в нулевом поле до T_1 . Здесь T_1 и T_2 – верхняя и нижняя температуры создания $pTRM$, соответственно. На практике часто наблюдается другая картина: при нагреве до T_1 $pTRM(T_1, T_2)$ не разрушается полностью, а обнаруживает хвост. Согласно ТК: а) хвост отсутствует у ОД зерен, б) хвост тянется до T_c у МД частиц, в) у ПОД зерен величина хвоста $pTRM(T_1, T_2)$ по отношению к величине самой $pTRM(T_1, T_2)$ меньше, чем у МД, и исчезает он при промежуточных температурах $T_1 < T < T_c$.

Заметим, что ТК носит качественный характер, поскольку классифицирует ДС образцов по виду кривой терморазмагничивания $pTRM(T)$. Щербакова и др. [1998] предложили его количественную модификацию. Для понимания введенных ниже обозначений напомним, что $pTRM$ могут различаться способом их создания. Обозначим как $pTRM_{св}(T_1, T_2)$ намагниченность, которая получается при охлаждении образца в нулевом поле “сверху”, от T_c до T_1 , где в интервале (T_1, T_2) включается поле. В другом случае – для создания $pTRM_{сн}(T_1, T_2)$ – образец в немагнитном пространстве нагревается до T_c и охлаждается до T_0 , после

чего нагревается “снизу” до T_1 , где и включается поле.

Выполним следующую процедуру: отнормируем величину хвоста $pTRM_{св}(T_1, T_2)$, на величину самой $pTRM_{св}(T_1, T_2)$, для чего после создания в образце $pTRM_{св}(T_1, T_2)$ и замера ее при T_0 , нагреем снова образец до T_1 , охладим до T_0 (все – в нулевом поле) и замерим оставшийся после терморазмагничивания хвост, который обозначим как $tail pTRM_{св}(T_1, T_2)$. Введем теперь следующий параметр для количественной характеристики ДС:

$$A_{св}(T_1, T_2) = \frac{tail pTRM_{св}(T_1, T_2)}{pTRM_{св}(T_1, T_2)}, \quad (1)$$

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

В наших экспериментах использовались 16 природных образцов (изверженные породы) и 2 искусственных (ХМ, В), где измельченные и просеянные зерна магнетита размером 60–80 мкм были размешаны в каолиновой матрице. Все образцы до проведения экспериментов были термостабилизированы выдержкой при температуре 700°C в течение часа. Для каждого кубика измерены магнитные параметры: намагниченность насыщения I_s , остаточная намагниченность насыщения I_{rs} , коэрцитивная сила H_c , остаточная коэрцитивная сила H_{cr} , магнитная восприимчивость k . Посчитаны, в качестве критериев оценки ДС, отношения I_{rs}/I_s , H_{cr}/H_c и отношение Кенигсбергера Q_r . Кроме того, в температурных интервалах (300, T_0), (400, 300) и (500, 400)°C у образцов исследовалось поведение $pTRM_{св}(T_1, T_2)$ и определены соответствующие параметры $A_{св}(T_1, T_2)$. В таблице для всех исследованных образцов приведены значения $A_{св}(300, T_0)$, H_{cr} , а также отношений I_{rs}/I_s , H_{cr}/H_c , Q_r и показана оценка доменной структуры по параметру $A_{св}(300, T_0)$.

Как видно из таблицы, в нашей коллекции у четырех образцов (16, 234, 324, У) значения $A_{св}(300, T_0) < 5\%$, и их можно отнести к ОД – что не вступает в противоречие с оценками их ДС по другим магнитным критериям. Остальные образцы относятся к ПОД и МД.

В нашей статье в основном речь будет идти о $pTRM_{св}(T_1, T_2)$ и, соответственно, об $A_{св}(T_1, T_2)$, поэтому, для упрощения записи, далее мы будем использовать эти обозначения без индекса “св”, и только в дискуссии, когда разница между $pTRM_{св}(T_1, T_2)$ и $pTRM_{сн}(T_1, T_2)$ будет важным фактором в объяснении результатов, мы вернемся к использованию индексов “св” и “сн”.

Для создания термоостаточных намагниченностей использовался терромагнитометр с вращающимся образцом конструкции Буракова–Виногра-

дова, чувствительность которого составляет 2×10^{-3} А/м. Прибор полностью автоматизирован и компьютеризирован, позволяет создавать $pTRM$ в любом температурном интервале от T_0 до 750°C , а также вести мониторинг температурного поведения остаточной намагниченности как при нагреве, так и при охлаждении. Максимальное магнитное поле, создаваемое на образце, – 320 А/м, вектор поля лежит в горизонтальной плоскости. Нижний конец державки находится при комнатной температуре, что позволяет менять положение образца по отношению к полю при любой температуре и на любой угол. Максимальный объем образцов, используемый в приборе, не превышает 1 см^3 .

Точки Кюри образцов определялись по кривым изменения с температурой T намагниченности насыщения $I_s(T)$, которые снимались на вибрационном магнитометре в поле $H = 0.55 T$. Для измерения H_c , H_{cr} , I_s и I_{rs} при T_0 применялся вибромагнитометр для работы в сильных полях напряженностью до 1.3 Тл: на каждом образце снималась петля гистерезиса $J(H)$, по которой и определялись величины H_c , I_s и I_{rs} , при этом производилась корректировка на парамагнитную составляющую путем вычитания линейной компоненты $I(H)$ из полного сигнала.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИЗЛОЖЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Идея эксперимента заключалась в том, чтобы последовательно симитировать (в лабораторных временных масштабах) два отмеченных во Введении случая возникновения в природных условиях многокомпонентной намагниченности. Для этого создать в исследуемом образце двух- или многокомпонентную TRM с заданным по отношению друг к другу направлением компонент. Далее, по стандартной процедуре, выполнить пошаговое терморазмагничивание образца: в нулевом поле сделать нагревы до последовательно возрастающих температур T_i и последующее охлаждение до T_0 . По результатам замеров при T_0 остаточной намагниченности построить диаграмму Зийдервельда образца и сравнить полученный результат о направлениях компонент с тем, что было задано.

1а). Основная серия экспериментов по имитации первого случая, а именно – *однократного поворота поля при охлаждении породы* от T_c до T_0 – проводилась следующим образом. Вначале для терморазмагничивания исследуемый образец нагревался до температур выше T_c . При T_c включалось внешнее магнитное поле $H = 80$ А/м, в котором кубик охлаждался до T_0 . При некоторой промежуточной температуре $T_{\text{пром}}$ положение державки с образцом по отношению к полю менялось на 90° , т.е. парциальные термонамагниченности – $pTRM(T_c, T_{\text{пром}})$ и $pTRM(T_{\text{пром}}, T_0)$ – создавались во взаимно перпендикулярных направлениях. Для

Магнитные и гистерезисные свойства образцов

Номер образца	$A(300, T_0)$ (%)	Тип ДС	I_{rs}/I_s	H_c (мТ)	H_{cr}/H_c	Q_t
16	0.76	ОД	0.26	24.8	2.2	9.3
234	1.83	ОД	0.28	27.3	2.95	12.2
324	3.79	ОД	0.3	30	2.26	9.9
572	6	ПОД	0.14	17.3	2.6	7.3
456	6.22	ПОД	0.18	9.2	2.27	7.9
192	6.8	ПОД	0.25	23.6	2.16	18
10b	7.6	ПОД	0.18	8.7	2.6	6.6
417	7.9	ПОД	0.23	23.4	2.2	16.1
327	11.3	ПОД	0.25	28.3	2	12.1
388	12.8	ПОД	0.19	20.5	2.2	8.9
12b	12.8	ПОД	0.09	10.8	2.9	4.6
11b	18.9	МД	0.14	14.3	2.2	4.6
7b	23.4	МД	0.09	10	2.85	3.4
ХМ	29	МД	0.06	6	2.9	3.77
1109	30	МД	0.08	10.6	2.9	2.9
8a	31.2	МД	0.17	21.1	2	14.4
В	36.8	МД	0.01	1.5	6.7	0.8

удобства будем считать, что низкотемпературная (НТ) $pTRM(T_{\text{пром}}, T_0)$ приобреталась вдоль оси X образца, а высокотемпературная (ВТ) $pTRM(T_c, T_{\text{пром}})$ – вдоль оси Y . Последующее пошаговое терморазмагничивание и замеры остаточной намагниченности образцов при T_0 выполнялись в том же терромагнитометре.

Примеры полученных диаграмм Зийдервильда $\{X(T_i), Y(T_i)\}$ на природных образцах с различной ДС (16 – ОД, 456 – ПОД, 7b – МД) приведены на рис. 1а, 1б, 1в, сплошные линии. Значения температур T_i указаны цифрами около репрезентативных точек, $T_{\text{пром}} = 500^\circ\text{C}$. Обозначим через ΔJ_x , ΔJ_y углы, которые образуют НТ- и ВТ-компоненты намагниченности с осями X и Y , соответственно. Величины этих углов представляют собой экспериментальную ошибку определения направлений (углов J_x , J_y) соответственно X - и Y -компонент остаточной намагниченности. Действительно, поскольку в интервале $(T_c, T_{\text{пром}})$ по полю была направлена ось Y образца, а после поворота державки на 90° в интервале $(T_{\text{пром}}, T_0)$ по полю была ось X , то результат определения направлений компонент, соответствующий заданным в эксперименте условиям, есть $J_x = 0^\circ$, $J_y = 90^\circ$, $\Delta J_x = \Delta J_y = 0$. Обратим внимание, что на графиках масштаб по X - и Y -осям часто разный; и как следствие – угол наклона компоненты при этом кажется визуально большим, чем на самом деле.

Как и следовало ожидать, только на ОД образце 16 наблюдается практически полная перпендикулярность компонент ($\Delta J_x = 1^\circ$, $\Delta J_y = 0^\circ$), на остальных ΔJ_i меняется от образца к образцу от 4° (образец 456) до 42° (образец В). Ошибка в опре-

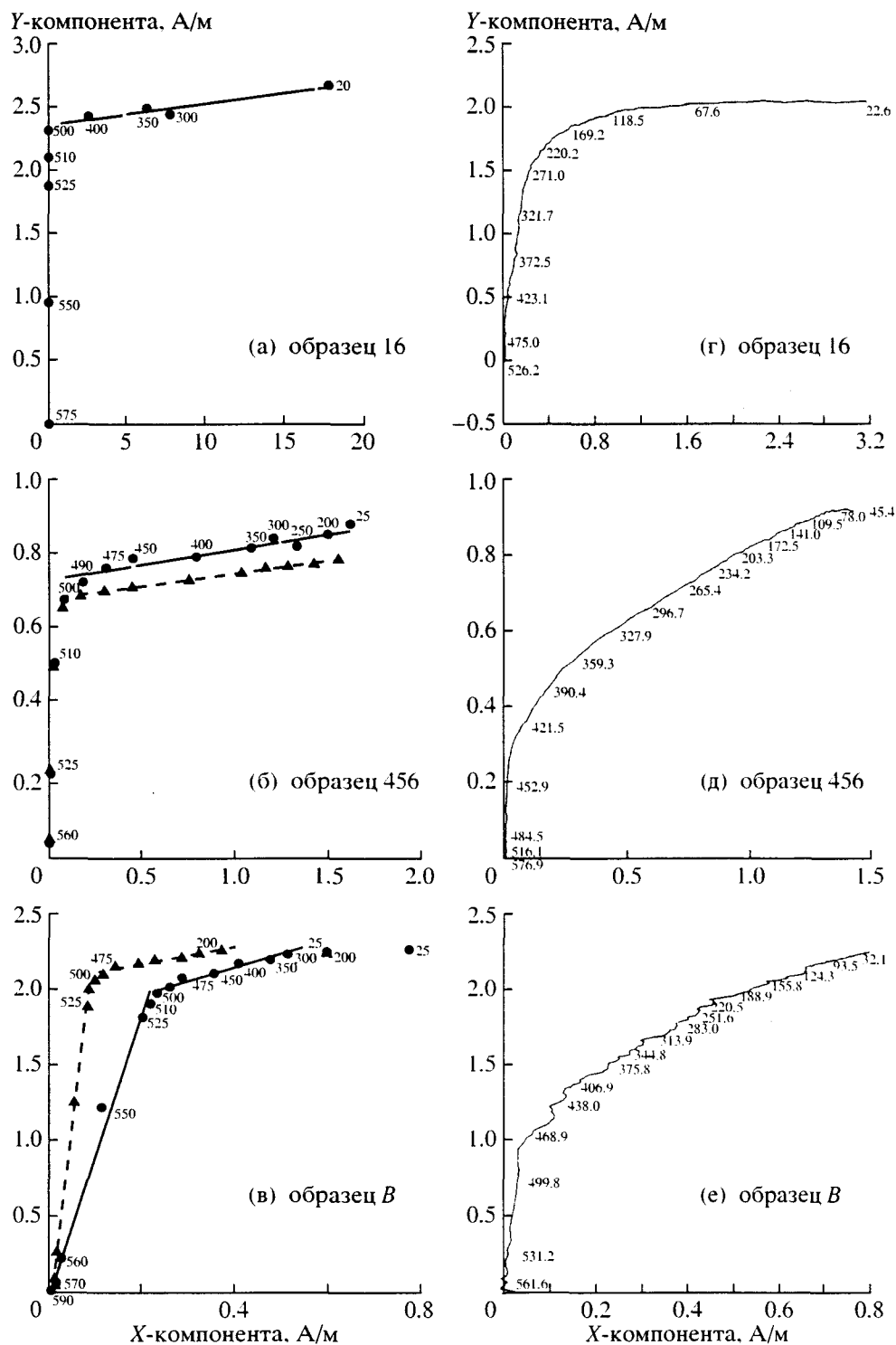


Рис. 1. Диаграммы Зийдверельда, построенные по результатам пошаговой (а), (б), (в) и непрерывной (г), (д), (е) термочисток образцов с разной доменной структурой: однодоменного 16 (а), (г), псевдооднодоменного 16 (а), (г) и многодоменного В (в), (е). Для создания в образцах двухкомпонентной TRM при температуре $T_{\text{пром}} = 500^\circ\text{C}$ направление внешнего магнитного поля менялось на 90° . На (а), (б), (в) сплошные линии относятся к случаю, когда это происходило при охлаждении образцов в поле от T_c к T_0 , и штриховые линии – к случаю повторного нагрева образцов до $T_{\text{пром}}$.

делении направления ВТ компоненты ΔJ_y , как правило, заметно меньше ΔJ_x . Как сказано во Введении, нашей задачей было проследить зави-

симость ΔJ_x и ΔJ_y от доменной структуры образца, которую, в свою очередь, мы здесь оцениваем по величине параметра $A(T_1, T_2)$. С этой целью мы

сопоставили ΔJ_x каждого образца со значениями $A(T_1, T_2)$ в том температурном интервале, где происходил поворот внешнего магнитного поля. Диаграмма $\Delta J_x A_{CB}(500-400)$ показана на рис. 2. Диаграмма наглядно иллюстрирует тенденцию возрастания ошибки ΔJ_x определения "палеонаправления" с ростом величины параметра $A(T_1, T_2)$ исследуемых образцов – при переходе от ОД к ПОД и далее к МД образцам. Особенно большие значения ΔJ_x демонстрируют МД образцы – природный 1109 и искусственные ХМ, В.

Другой характерной чертой диаграмм Зийдervильда у МД и ПОД образцов является "затянутость" перехода от низко- к высокотемпературному "палеонаправлению": выделяется некий температурный интервал в $(25-80)^\circ\text{C}$, включающий $T_{\text{пром}}$, в котором зачастую наблюдается постепенный поворот вектора остаточной намагниченности от оси X к оси Y, то есть от направления НТ компоненты $pTRM(T_{\text{пром}}, T_0)$ к направлению ВТ компоненты $pTRM(T_c, T_{\text{пром}})$. Для пояснения этого утверждения рассмотрим рис. 1в (МД образец В), где, например, репрезентативная точка для $T_i = 525^\circ\text{C}$ не идентифицируется ни с одним из этих направлений, хотя эта температура выше $T_{\text{пром}} = 500^\circ\text{C}$. Заметим, что в литературе появление такого типа диаграмм обычно объясняется наложением химической и термоостаточной намагниченностей различного направления [McClelland, 1982].

16). В качестве варианта имитации первого случая были выполнены несколько экспериментов, когда направление поля (точнее, позиция кубика по отношению к полю) в процессе его остывания от T_c до T_0 менялось два и больше раз. Рис. 3а и 3б иллюстрируют двукратный поворот на 45° – последовательно при 500 и 400°C – для ОД образца 16 и МД образца В, соответственно. Тенденция та же: на ОД образце все три компоненты определяются с минимальной ошибкой в $(1.5-3)^\circ$. В случае МД образца на диаграмме три компоненты намагниченности можно выделить при двух условиях: а) в температурных интервалах (200, 400), (400, 525) и (525, 590) $^\circ\text{C}$, которые не совпадают с интервалами, где направление поля было постоянным (T_0 , 400), (400, 500) и (500, 590) $^\circ\text{C}$; б) определяемые направления компонент по отношению к оси X (28° , 65° и 86°) заметно отличаются от заданных направлений (0° , 45° и 90°).

Рис. 3в относится к эксперименту с образцом 16, когда при остывании от T_c к T_0 позиция кубика по отношению к полю менялась на 90° через каждые 100°C , т.е. последовательно при 500, 400, 300, 200 и 100°C . Диаграмма имеет ступенчатый вид, все повороты прослеживаются при заданных температурах и $\approx 90^\circ$. Этот результат лишний раз подчеркивает предпочтительность ОД образцов для палеомагнитных исследований.

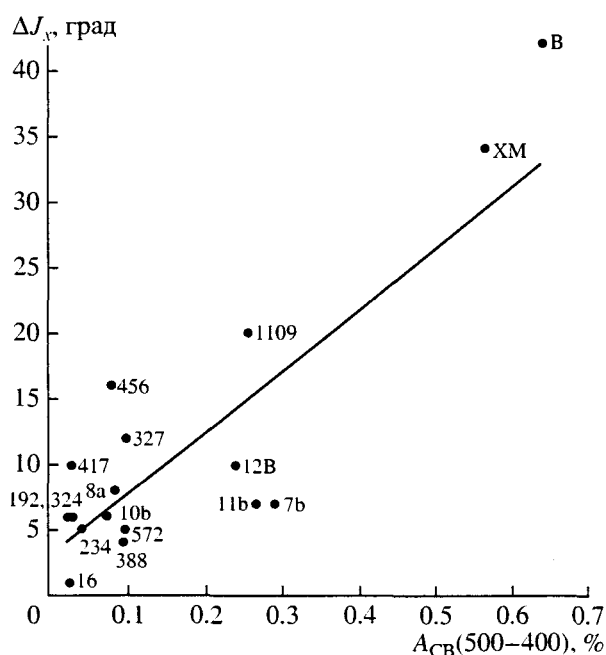


Рис. 2. Зависимость ошибки ΔJ_x определения направления X-компоненты остаточной намагниченности образцов от величины их параметра $A(500, 400)$ (см. текст).

1в). Стандартная процедура термочистки происходит ступенчатым образом: в нулевом поле образец нагревается до T_i и охлаждается до T_0 , где замеряется остаточная намагниченность. Но, если аппаратура позволяет делать замеры намагниченности при высоких температурах, возможен другой – непрерывный – вариант термочистки: замерять остаточную намагниченность при достижении T_i и греть дальше, до следующей T_{i+1} , не возвращаясь каждый раз к T_0 . На первый взгляд такой вариант кажется привлекательным, поскольку заметно ускоряет процесс термочистки.

Термомагнитометр с вращающимся образцом, использованный в наших экспериментах, позволяет вести непрерывный мониторинг температурной зависимости обеих горизонтальных компонент $\{X(T), Y(T)\}$ остаточной намагниченности в нулевом поле. Это позволило нам провести цикл экспериментов с непрерывным вариантом термочистки и сравнить диаграммы Зийдervильда одного и того же образца, построенные по результатам ступенчатой и непрерывной термочистки.

Диаграммы Зийдervильда для образцов 16, 456 и В, построенные по результатам непрерывной термочистки, показаны на рис. 1г–1е, $T_{\text{пром}} = 500^\circ\text{C}$; пошаговые диаграммы этих же образцов представлены ранее на рис. 1а–1в. Обращает на себя внимание большая разница в виде этих диаграмм: ни о какой перпендикулярности компонент $X(T)$ и $Y(T)$ при их непрерывной записи не может быть и речи (даже для ОД образца 16). Для всех образцов, независимо от их ДС, в низкотем-

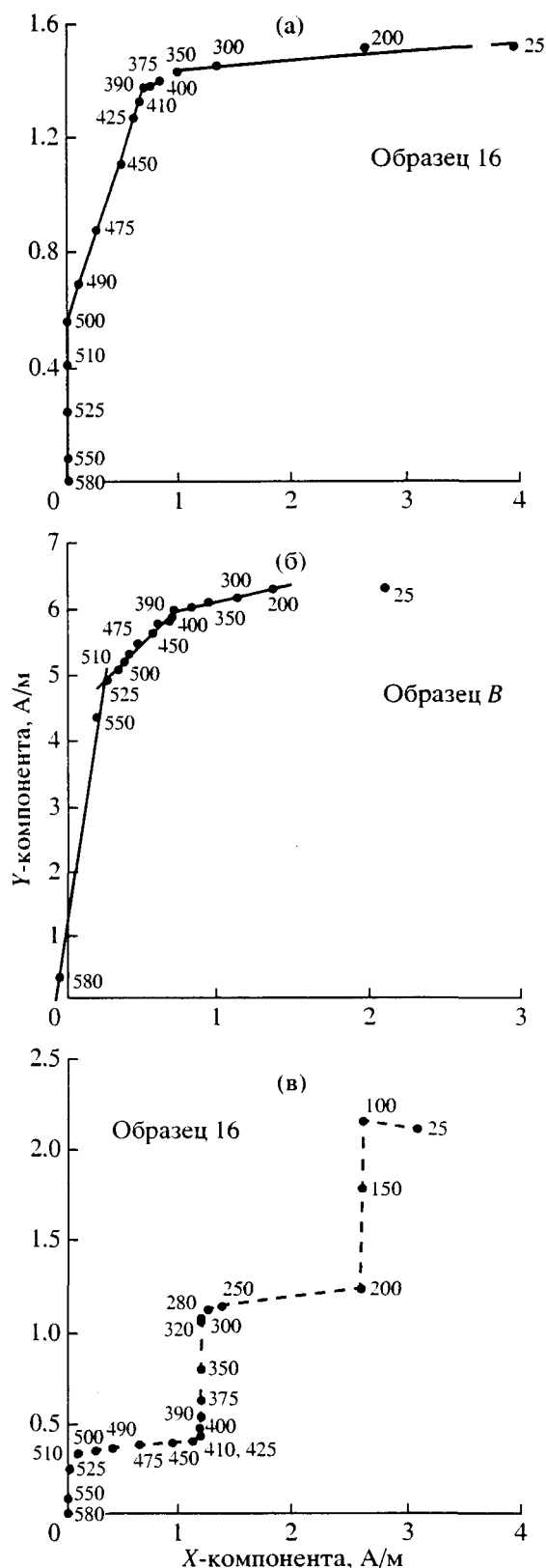


Рис. 3. Пошаговые диаграммы Зийдervельда образцов 16 (ОД) и В (МД). При охлаждении образцов от T_c к T_0 направление внешнего магнитного поля менялось дважды на 45° (а), (б) – при $T_{\text{пром}1} = 500^\circ\text{C}$ и $T_{\text{пром}2} = 400^\circ\text{C}$ и на 90° через каждые 100°C (500, 400, 300, 200 и 100°C) – (в), образец 16.

пературном интервале при $T < T_{\text{пром}}$ непрерывная диаграмма Зийдervельда имеет необычный вид выпуклой кривой – в отличие от пошаговой диаграммы, которая обычно может быть представлена в виде набора линейных отрезков.

2). При имитации второго случая, а именно – поворота внешнего магнитного поля при вторичном прогреве породы – в образце вначале создавалась в одном направлении и замерялась при T_0 полная TRM , после чего образец поворачивался на 90° , нагревался до $T_{\text{пром}}$ и охлаждался до T_0 в поле, перпендикулярном тому, в котором создавалась TRM . Таким образом в образце снова искусственно создавались две взаимно перпендикулярные $pTRM$. Примеры полученных диаграмм для ПД образца 456 и МД образца В приведены на рис. 1б, 1в (штриховые линии), соответственно: для ОД образца 16 она совпадает с ранее показанной на рис. 1а. Диаграммы не имеют принципиальных различий в общем виде, но ошибки определения направлений ΔJ_x , ΔJ_y во втором случае несколько меньше.

ДИСКУССИЯ

Причины наблюдаемых явлений в случае стандартного пошагового терморазмагничивания кроются, как уже говорилось выше, в нарушении законов Телье для $pTRM$. Для лучшего понимания конкретного механизма возникновения ошибки определения “палеонаправлений” рассмотрим сначала, что происходит в случае ОД зерен, когда эти законы выполняются, и $\Delta J_x = \Delta J_y = 0$. При пошаговой термочистке ОД образца до некоторой $T_i < T_{\text{пром}}$ остаточную намагниченность теряют только те зерна, блокирующие температуры которых $T_b < T_i$; зерна с $T_i < T_b < T_{\text{пром}}$, несущие ту же НТ компоненту, сохраняют как величину, так и направление своей намагниченности. ВТ компонента $pTRM(T_c, T_{\text{пром}})$ при этом вообще не затрагивается ($T_b > T_{\text{пром}}$). Когда T_i достигает $T_{\text{пром}}$, НТ компонента полностью исчезает, и при дальнейшем прогреве разрушается лишь ВТ компонента $pTRM(T_{c2}, T_{\text{пром}})$. Этот процесс последовательного и независимого друг от друга разрушения двух компонент – $pTRM(T_{\text{пром}}, T_0)$ и $pTRM(T_c, T_{\text{пром}})$ – на графике (рис. 1а) отражается в том, что вначале репрезентативные точки $T_i < T_{\text{пром}}$ (в низкотемпературном интервале) движутся по горизонтали вдоль оси X к оси Y . При $T_i = T_{\text{пром}}$ $pTRM(T_0, T_{\text{пром}}) = 0$, так что соответствующая репрезентативная точка имеет координаты $\{X = 0, Y = pTRM(T_c, T_{\text{пром}})\}$ и располагается на оси Y . При дальнейшем терморазмагничивании до $T_i > T_{\text{пром}}$ разрушается только $pTRM(T_c, T_{\text{пром}})$, репрезентативные точки движутся вниз по оси Y , в результате на графике НТ и ВТ компоненты взаимоперпендикулярны.

Все вышесказанное можно формализовать следующим образом:

$$X(T_i) = pTRM(T_{\text{пром}}, T_i),$$

$$Y(T_i) = pTRM(T_c, T_{\text{пром}}), \quad T_i < T_{\text{пром}}, \quad (2)$$

$$X(T_i) = 0, \quad Y(T_i) = pTRM(T_c, T_i), \quad T_i > T_{\text{пром}},$$

где $X(T_i)$ и $Y(T_i)$ – координаты репрезентативных точек на диаграмме Зийдервельда.

В случае ПОД и МД образцов картина другая. Как уже отмечалось во Введении, температурное поведение $pTRM$ таких образцов имеет целый ряд характерных особенностей, из которых отметим две, необходимые для объяснения представляемых здесь результатов. При нагреве ПОД или МД образца до любой температуры T_i имеют место: а) неполное разрушение НТ $pTRM(T_i, T_0)$ (имеется *хвост* при $T \geq T_i$) и б) частичное разрушение ВТ $pTRM(T_c, T_i)$ [Shcherbakov, Shcherbakova, 2001].

Это означает, что при пошаговой термочистке ПОД и МД образцов, в отличие от ОД случая, нет независимого разрушения обеих – НТ- и ВТ-компонент. Фактор а) (существование хвостов $pTRM$) ведет к тому, что НТ компонента $pTRM(T_{\text{пром}}, T_0)$ не разрушается до конца при нагреве до $T_{\text{пром}}$, и при $T_i = T_{\text{пром}}$ репрезентативная точка $\{X(T_{\text{пром}}), Y(T_{\text{пром}})\}$ на диаграмме Зийдервельда не достигает оси Y . В результате в процессе дальнейшей термочистки (до температур $T_i > T_{\text{пром}}$) происходит видимое отклонение ВТ компоненты от вертикали, как это видно на рис. 1б, 1в. Одновременно, в силу действия фактора б), при нагревах до $T_i < T_{\text{пром}}$ частично разрушается и ВТ Y -компонента – $pTRM(T_c, T_{\text{пром}})$ – на величину $\Delta pTRM(T_c, T_{\text{пром}})|_{T=T_i}$. На графиках (рис. 1б, 1в) это отражается в том, что в интервале $(T_{\text{пром}}, T_0)$ репрезентативные точки для нагревов до температур $T_i < T_{\text{пром}}$ смещаются на соответствующие величины вниз от горизонтали, в результате НТ X -компонента образует некий угол с осью X – появляется ошибка ΔJ_x в определении направления этой компоненты.

Очевидно, с учетом изложенных выше соображений, формула (2) в случае ПОД и МД образцов должна быть модифицирована следующим образом:

$$X(T_i) = pTRM(T_{\text{пром}}, T_i) + \text{tail } pTRM(T_i, T_0)|_{T=T_i},$$

$$Y(T_i) = (pTRM(T_c, T_{\text{пром}}) - \Delta pTRM(T_c, T_{\text{пром}})|_{T=T_i}),$$

$$T_i < T_{\text{пром}},$$

$$X(T_i) = \text{tail } pTRM(T_{\text{пром}}, T_0)|_{T=T_i}, \quad (3)$$

$$Y(T_i) = pTRM(T_c, T_i) - \Delta pTRM(T_c, T_i)|_{T=T_i} +$$

$$+ \text{tail } pTRM(T_i, T_{\text{пром}})|_{T=T_i}, \quad T_i > T_{\text{пром}},$$

где $\text{tail } pTRM(T_{\text{пром}}, T_0)|_{T=T_i}$ есть остаток от терморазмагничивания хвоста $pTRM(T_{\text{пром}}, T_0)$ при прогреве образца до T_i . Остается лишь сказать, что

оба эти явления вместе (наличие хвостов и спад ВТ $pTRM$) объясняют также упомянутую в предыдущем разделе “затяжку” изменения направления полного вектора остаточной намагниченности от низко- к ВТ компоненте при переходе T_i через $T_{\text{пром}}$.

Здесь уместно обратить внимание на то, что именно последнее явление – спад ВТ $pTRM$ – является главной причиной появления вогнутых диаграмм Арай–Нагата при определении палеонапряженности методом Телье [Shcherbakov, Shcherbakova, 2001]. И, как показано выше, этот же фактор вносит основную ошибку в определение палеонаправлений.

Обсудим, в свете вышеизложенного, различия, которые имеют место при первом и втором обсуждаемых здесь случаях возникновения в природе многокомпонентной намагниченности. Будем иметь в виду при этом прежде всего ПОД и МД образцы. В первом случае обе компоненты – высоко- и НТ – создаются при охлаждении образца от T_c к T_0 , т.е., по определению (см. выше), обе $pTRM$ по способу своего создания есть $pTRM_{\text{св}}$. Во втором случае НТ компонента, которая создается при вторичном прогреве образца от T_0 до $T_{\text{пром}}$ и охлаждении его до T_i в перпендикулярном поле, есть $pTRM_{\text{св}}(T_{\text{пром}}, T_0)$. При этом все приведенные выше рассуждения и формулы остаются в силе, но с подстановкой $pTRM_{\text{св}}(T_{\text{пром}}, T_i)$ вместо $pTRM(T_{\text{пром}}, T_i)$, отчего вид диаграмм Зийдервельда принципиально не изменится. Что же касается количественной стороны, т.е. величины ошибок ΔJ_x , ΔJ_y определения направлений компонент, то во втором случае они заметно уменьшаются (рис. 1б, 1с, штриховые линии), и причиной этому являются свойства $pTRM_{\text{св}}$.

Действительно, как показано ранее [Shcherbakov et al., 2001], $pTRM_{\text{св}}(T_{\text{пром}}, T_0)$ обладает большей стабильностью к нагревам в сравнении с $pTRM_{\text{св}}(T_{\text{пром}}, T_0)$, в частности, $\text{tail } pTRM_{\text{св}}(T_{\text{пром}}, T_0) < \text{tail } pTRM_{\text{св}}(T_{\text{пром}}, T_0)$. Отсюда сразу же следует, что отклонение ВТ компоненты от вертикали ΔJ_y во втором случае должно быть заметно меньше, чем в первом, что и наблюдается на эксперименте. Далее, при вторичном прогреве породы (образца) от T_0 до $T_{\text{пром}}$ ВТ компонента $pTRM_{\text{св}}(T_c, T_{\text{пром}})$ уже частично разрушается [на величину $\Delta pTRM_{\text{св}}(T_c, T_{\text{пром}})|_{T=T_{\text{пром}}}$] и тем самым частично стабилизируется. Поэтому при последующей термочистке в интервале $(T_{\text{пром}}, T_0)$, т.е. при нагревах образца до температуре $T_i < T_{\text{пром}}$, ее спад будет меньше, чем в первом случае – а, значит, будет меньше и отклонение НТ компоненты от горизонтали, т.е. ошибка ΔJ_x .

Перейдем теперь к анализу процесса непрерывного терморазмагничивания. Для понимания причин возникновения в этом случае “кривых” диаграмм Зийдервельда снова рассмотрим для

простоты случай ОД образца, когда законы Телье выполняются, нет хвостов $pTRM$, нет разницы между $pTRM_{св}$ и $pTRM_{св}$. Существенное отличие методики непрерывного терморазмагничивания от пошагового заключается в следующем: намагниченность, замеряемая при *повышенных температурах* $T_i < T_{пром}$, меньше по своему значению той же намагниченности, но замеренной при T_0 , на величину температурного спада спонтанной намагниченности $I_s(T_i)$. При этом следует учесть, что спад $I_s(T_i)$ уменьшает значения как НТ $pTRM(T_{пром}, T_0)$, так и ВТ (sic!) $pTRM(T_c, T_{пром})$. Поскольку в случае ОД зерен величина $pTRM(T_c, T_{пром})$ есть не что иное как Y – компонента изображающей точки $\{X(T_i), Y(T_i)\}$ на диаграмме Зийдервельда, то спад $pTRM(T_c, T_{пром})$ за счет $I_s(T_i)$ отобразится там в виде смещения этой точки вниз от оси X . Подчеркнем, что это явление имеет место при всех $T_i < T_{пром}$, что и приводит к закругленным, спадающим к началу координат диаграммам (рис. 1). Координаты репрезентативных точек на диаграмме Зийдервельда описываются при этом формулами (напомним, что рассматривается случай ОД образца):

$$\begin{aligned} X(T_i) &= i_s(T_i)pTRM(T_{пром}, T_i), \\ Y(T_i) &= i_s(T_i)pTRM(T_c, T_{пром}), \quad T_i < T_{пром}, \\ X(T_i) &= 0, \quad Y(T_i) = i_s(T_i)pTRM(T_c, T_i), \\ &\quad T_i > T_{пром}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $i_s(T_i) = I_s(T_i)/I_s(T_0)$ – относительная спонтанная намагниченность. В случае ПОД и МД образцов все вышеприведенные рассуждения сохраняют свою силу, за исключением того, что формула (4) будет иметь более сложный и громоздкий вид.

Заметим, что подобные непрерывные диаграммы Зийдервельда обсуждались ранее в работе [Schmidt, Clark, 1985], где авторы уже обратили внимание на разницу между пошаговыми и непрерывными диаграммами Зийдервельда. Они же предложили способ исправления непрерывных диаграмм, внося поправки в поведение вектора остаточной намагниченности за счет спада $I_s(T)$. Однако практическое осуществление этой рекомендации весьма затруднено. Для ее выполнения необходимо знать кривую зависимости $I_s(T)$ каждого исследуемого образца, которую можно получить или на дубликатах (если они имеются), или на тех же исследуемых образцах, но после окончания термочистки, т.е. после нагрева до T_c . Почти неизбежные при этом структурные и минералогические изменения образцов могут внести свои неконтролируемые ошибки в определение палеонаправлений.

ВЫВОДЫ

1. Доменная структура ферромагнитных зерен определенно сказывается на результатах опреде-

ления палеонаправлений на породах, несущих многокомпонентную термоостаточную намагниченность. Это влияние проявляется в том, что в случае ПОД и МД образцов направления компонент определяются с ошибкой.

2. Показано, что когда в образце создается TRM , состоящая из двух взаимно перпендикулярных компонент, ошибка ΔJ_x в определении направления НТ-компоненты при переходе от ПОД к МД образцам растет от 4° до 42° . Обнаружена корреляция между ΔJ_x и параметром $A_{св}(T_1, T_2)$, характеризующим степень нарушения законов Телье для $pTRM$ (величину хвостов $pTRM$) в исследуемом образце.

3. Причина возникновения наблюдаемых ошибок та же, что и в случае определения палеонапряженности методом Телье, и связана с поведением $pTRM$ и нарушением законов Телье независимости и аддитивности $pTRM$ в ПОД и МД зернах.

Авторы выражают искреннюю благодарность д-р физ.-мат. наук Д.М. Печерскому за полезную дискуссию. Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 00-05-64008 и № 01-05-64240.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Большаков А.С., Щербакова В.В. Термомагнитный критерий определения доменной структуры ферромагнетиков // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1979. № 2. С. 38-47.
- 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 $pTRM$ многодоменных и псевдооднодоменных зерен и о применимости в этих случаях методики Телье определения палеонапряженности // ВЕСТНИК ОГГГН РАН, электронный научно-информационный журнал. 1998. http://www.scgis.ru/russian/cpl251/h_dgggms/4-98/tcherbakov.htm.
- Levi S. The effect of magnetite particle size on paleointensity determinations of the geomagnetic field // Phys. Earth Planet. Inter. 1977. V. 13. P. 245-259.
- McClelland-Brown E. Discrimination of TRM and CRM by blocking-temperature spectrum analysis // Phys. Ear. Plan. Int. 1982. V. 30. P. 405-414.
- Schmidt P.W., Clark D.A. Step-wise and continuous thermal demagnetization and theories of thermoremanence // Geophys. J. 1985. V. 83. P. 731-751.
- Shcherbakov V.P., Shcherbakova V.V. On suitability of the Thellier method of paleointensity determinations to pseudosingledomain and multidomain grains // Geophys. J. International. 2001. V. 146. P. 20-30.
- Shcherbakov V.P., Shcherbakova V.V., Vinogradov Y.K., Heider F. Thermal stability of pTRMs created from different magnetic states // Phys. Ear. Plan. Int. 2001a. V. 126/1-2. P. 69-83.