

УДК 550.382.3

САМООБРАЩЕНИЕ НАМАГНИЧЕННОСТИ ПРИРОДНЫХ ТИТАНОМАГНЕТИТОВ

© 2004 г. В. И. Трухин, В. А. Жилыева, Е. С. Курочкина

Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию 09.10.2003 г.

В статье рассматривается физика явления самообращения намагниченности. Проведен анализ работ авторов по самообращению TRM природных гомеильменитов и титаномagnetитов с точки зрения наиболее вероятных физических механизмов этого явления. Проведены эксперименты по изучению самообращения TRM на образцах драгированных базальтов (разлом Романш, хребет Шписс, Атлантический океан), содержащих титаномagnetиты. Показано, что самообращение TRM имеет место на определенной стадии однофазного окисления титаномagnetита ($T_c \sim 300^\circ\text{C}$). Авторы делают вывод, что наиболее вероятным механизмом самообращения TRM природных гомеильменитов и титаномagnetитов является механизм Нееля, основанный на температурной зависимости спонтанной намагниченности /V-типа.

ВВЕДЕНИЕ. ФИЗИКА САМООБРАЩЕНИЯ

В настоящей статье сообщается о работах авторов по проблеме самообращения намагниченности (намагниченность - магнитный момент единицы объема вещества) природных титаномagnetитов и их аналогов, содержащихся в континентальных и океанических горных породах, и рассматриваются возможные механизмы этого явления. Дается также необходимый обзор работ других авторов по этой проблеме.

Сначала кратко изложим физическую суть изучаемого явления и историю его изучения.

Энергия магнитного момента M во внешнем магнитном поле H равна

$$E_H = -(\mathbf{M}\mathbf{H}) = -MH\cos\alpha, \quad (1)$$

где α - угол между M и H . При $\alpha = 0$ энергия E_H будет наименьшей, поэтому в поле H момент M ориентируется по H .

Однако при термонамагничивании (при охлаждении образца от температуры T , близкой к точке Кюри T_c , до комнатной T_0 или более низких T) некоторых природных ферримagnetитов обнаружены случаи антипараллельной полю H ориентации суммарной термонамагниченности I_r (и термоостаточной намагниченности TRM). Эффект намагничивания ферримagnetитика антипараллельно полю H называется самообращением намагниченности, так как он обуслов-

лен особыми свойствами самого ферримagnetитика.

Впервые определенно эффект самообращения на природных ферримagnetитиках был обнаружен японским геофизиком [Нагата, 1965] при лабораторном термонамагничивании образца дацитовой породы горы Харуна. Лабораторное термонамагничивание - это моделирование природного процесса намагничивания изверженных горных пород в геомагнитном поле (H_m) при их охлаждении после извержения.

При ориентации намагниченности по полю (ур. 1) возникает термодинамически равновесное магнитное состояние ферримagnetитного образца. Соответственно, образование в образце антипараллельной полю H (обратной) намагниченности следует рассматривать как возникновение неравновесного магнитного состояния ("замороженная" обратная TRM).

Такое состояние может быть достигнуто в ферримagnetитике из-за его сложного строения в процессе его термонамагничивания. Спонтанный магнитный момент M_s двухподрешеточного ферримagnetитика изначально, по своей природе, состоит из двух антипараллельно направленных, не равных по величине моментов (M_{sA} и M_{sB}) магнитных подрешеток A и B :

$$\mathbf{M}_s = \mathbf{M}_{sB} - \mathbf{M}_{sA} \quad (2)$$

Поэтому, если $M_{sB} > M_{sA}$, то при ориентации суммарной M_s по направлению H значительная

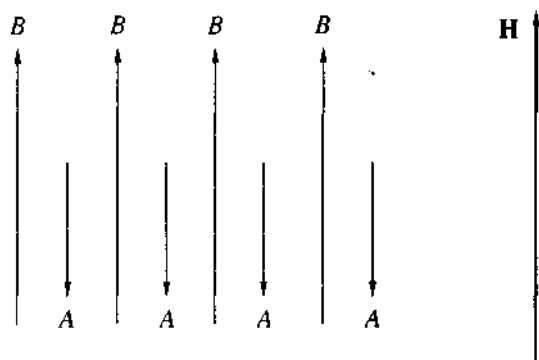


Рис. 1. Схема расположения атомных магнитных моментов в подрешетках A и B ферримагнетика.

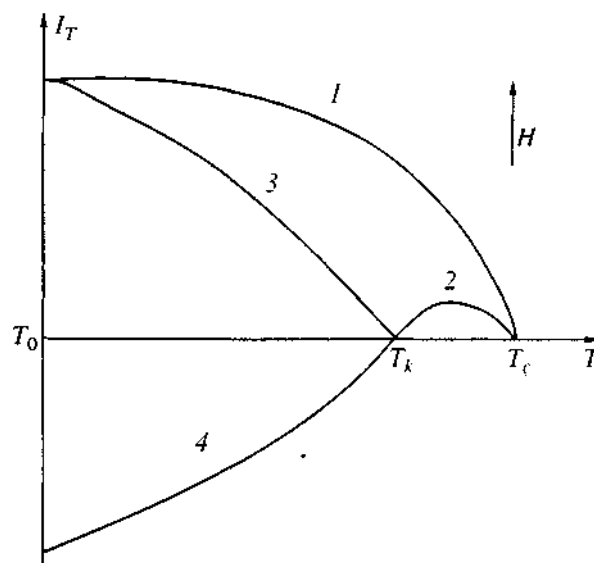


Рис. 2. Схема процесса термонамагничивания: 1 — $I_T(T)$ ферримагнетика, в котором отсутствует точка компенсации; 2 — зависимость $I_T(T)$ в интервале температур (T_c, T_k) ферримагнетика с точкой компенсации T_k ; 3 — $I_T(T)$ в интервале температур (T_k, T_0) при $H > H_c$; 4 — $I_T(T)$ в интервале температур (T_k, T_0) при $H < H_c$.

часть атомных магнитных моментов (рис. 1), сумма которых равна M_{SA} , будет ориентирована антипараллельно H . Рассмотрим схему процесса термонамагничивания (рис. 2). Возникшая при температуре, близкой к T_c ферримагнетика ориентация магнитных доменов по H закрепляется внешним магнитным полем H и возникающим в процессе охлаждения потенциальным рельефом ферримагнетика, создающим спектр локальных минимумов потенциальной энергии, в которых располагаются соответствующим образом ориентированные домены. При комнатной температуре T_0 образуется намагниченность I_T , величина которой будет определяться степенью ориентации магнитных моментов доменов, по направлению H в зависимости от напряженности H (рис. 2, кривая 1). При полной ориентации всех магнитных моментов доменов по полю насыщения $H_s I_T = I_s$. При отключении H остается термоостаточная намагниченность TRM, составляющие ее домены удерживаются достаточно глубокими потенциальными ямами. В среднем устойчивость TRM можно охарактеризовать коэрцитивной силой H_c .

Ориентации и величины магнитных моментов M_{SB} , M_{SA} в подрешетках A и B определяются величинами обменных взаимодействий внутри подрешеток (энергии E_{AA} и E_{BB}) и между подрешетками (E_{AB}). Существенным является то, что все эти величины (M_{SA} , M_{SB} , E_{AA} , E_{BB} , E_{AB}) могут изменяться с изменением температуры. Изменения могут быть настолько существенными, что при некоторой температуре компенсации T_k в доменах ферримагнетика возникает ситуация, когда $M_{SB} = M_{SA}$ и $M_s = 0$. По обе стороны от T_k суммарный момент каждого домена M_s будет иметь различную ориентацию в связи с тем, что при $T > T_k \rightarrow M_{SB} > M_{SA}$, при $T < T_k \rightarrow M_{SA} > M_{SB}$. Это относится и к спонтанной намагниченности всего ферримагнитного

образца. Возможность существования ферримагнетиков, у которых зависимости $I_s(T)$ имеют при некоторой $T = T_k$ величину $I_s(T_k) = 0$ (кривые /V-типа), была теоретически установлена в работе [Neel, 1951].

При термонамагничивании такого ферримагнетика в интервале температур $T_k < T < T_c$ будет возникать намагниченность I_T , ориентированная по направлению H , сначала по мере охлаждения от T_c увеличивающаяся, затем при приближении T к T_k уменьшающаяся, в связи с уменьшением I_s ферримагнетика. При $T = T_k$ намагниченность $I = 0$ (рис. 2, кривая 2). При дальнейшем охлаждении ниже T_k могут встретиться два случая, зависящих от величины I_s доменов и от соотношения величин коэрцитивной силы H_c и внешнего поля H .

Если при $T < T_k$ поле $H > H_c$, то при дальнейшем охлаждении ниже T_k намагниченность будет вновь увеличиваться по направлению H (рис. 2, кривая 3), так как магнитной энергии $I_s H v$ (v — объем домена) будет достаточно для разворота доменов по направлению H . А в случае, если поле $H < H_c$, то разворот доменов ввиду малости энергии $I_s H v$ будет невозможен и при $T < T_k$ за счет роста I_s , направленной по I_{SA} , будет увеличиваться I_T в антипараллельном по отношению к H направлению (рис. 2, кривая 4).

Рассмотренный процесс (рис. 2, кривые 2 + 4) является процессом самообращения термонамаг-

ниченности на ферритмагнетиках, имеющих кривые $I_s(T)$ типа N по Неелю.

Образовавшаяся термоостаточная намагниченность будет находиться в неравновесном состоянии и будет удерживаться локальными энергетическими барьерами ферритмагнетика.

Аналогичное изменение на 180° направления I_s в доменах может произойти и за счет диффузии магнитных ионов между подрешетками. Поэтому возможно самообращение намагниченности и в результате химических процессов в ферритмагнитных минералах [Verhoogen, 1956].

Существуют и другие представления о механизмах самообращения намагниченности в ферритмагнитных минералах горных пород [Jacobs, 1994]. Еще в 1954 году [Грабовский, Пушков, 1954] было показано, что самообращение намагниченности возможно за счет магнитостатического взаимодействия между двумя соприкасающимися образцами двух минералов: магнетита и пирротина. Предполагается, что магнитостатическое взаимодействие возможно и в природных мелких ферритмагнитных зернах, имеющих двухфазное строение [Dunlop, Ozdemir, 1997]. В этой же работе рассматривается возможность самообращения двухфазных минералов за счет обменного взаимодействия между различными фазами.

На наш взгляд, наиболее легко осуществимым и поэтому наиболее вероятным является самообращение, происходящее по первому из рассмотренных нами механизмов, а именно при термонамагничивании в достаточно слабых полях H ферритмагнетиков, имеющих точку компенсации T_k , в которой происходит изменение знака I_s в ферритмагнетике. В этом случае достаточно, чтобы ферритмагнитные зерна имели определенный химический состав, при котором суммарная спонтанная намагниченность I_s подрешеток изменяет свой знак при $T=T_k(T_c < T_k < T_\theta)$ при изменении T в интервале $(T_c < T_k < T_\theta)$. Смена знака I_s происходит за счет изменения обменного взаимодействия, энергия которого на несколько порядков больше энергии магнитных доменов в слабом магнитном поле (например, в $H = 0.1$ мТл).

В случае самообращения намагниченности в двухфазных минералогических системах необходимо, во-первых, чтобы химические составы этих фаз были одинаковыми во всех зернах образца ферритмагнетика. Во-вторых, эти фазы должны быть в очень тесном и строго определенном соседстве друг с другом. В-третьих, их поля, развивающиеся I_s одной из фаз на 180° , должны

быть направлены строго антипараллельно внешнему полю Y и по напряженности должны превышать его. В случае магнитостатического взаимодействия между фазами, энергия такого взаимодействия будет одного порядка с энергией доменов во внешнем поле H и процесс самообращения может быть нечетким.

Несмотря на высказанные нами соображения о наиболее вероятном физическом механизме самообращения, мы считаем, что явление это очень важное и к настоящему времени недостаточно изученное. Поэтому необходимо продолжать изучение самообращения намагниченности на различных типах континентальных и океанских горных породах.

Ранее нами были исследованы эффекты самообращения намагниченности на природных пикроильменитах (аналоги гемогилеменинов) и синтезированных гемогилеменинов [Трухин и др., 1984; 1984а; Трухин и др., 1989; Трухин, Караевский, 1985; 1996; Трухин и др., 1997]. Интересно отметить, что образцы г. Харуна (Япония), на которых впервые было обнаружено явление самообращения TRM, продолжают изучаться и в настоящее время [Ozima, Oshima, Funaki, 2003]. Авторами статьи получена зависимость явления самообращения TRM от состава гемогилеменина (твердый раствор гематита $(1-x)a\text{Fe}_2\text{O}_3$ и ильменита $x\text{FeTiO}_3$). Это явление наблюдается в интервале величин x от 0.582 до 0.62. При исследовании нами синтезированных аналогов гемогилеменинов [Трухин и др., 1997], самообращение TRM также проявлялось у образцов с x от 0.55 до 0.62. Это может свидетельствовать о вполне определенном составе гемогилеменина, ответственного за это явление. В работах [Нагата, 1965; Haag et al., 1990; 1993; Трухин, Караевский, 1996; Трухин и др., 1997; Prevot et al., 2001] были обсуждены возможные механизмы самообращения TRM на этих ферритмагнетиках.

ИССЛЕДОВАНИЯ САМООБРАЩЕНИЯ TRM НА ТИТАНОМАГНЕТИТАХ

Ниже мы более подробно остановимся на явлении самообращения намагниченности на горных породах, содержащих титаномagnetиты или их аналоги. Будут обсуждены как опубликованные работы, так и последние результаты, полученные нами на образцах океанских базальтов.

Как известно, понятие титаномagnetит достаточно широкое, по существу это минералы, являющиеся членами ряда твердых растворов магне-

тит Fe_3O_4 -ульвошпинель Fe_2TiO_4 . Ульвошпинель может содержать Mg и другие изоморфные, двухвалентные ионы металлов. Титаномagnetиты при однофазном окислении переходят в титаномagnetиты, при дальнейшем гетерофазном окислении происходит распад титаномagnetита на magnetит и ламеллиильменит.

Исследования самообращения TRM, обсуждаемые ниже, проводились на титаномagnetитах, находящиеся на определенной стадии окисления или распада. Достаточно подробно рассмотрены разнообразные случаи самообращения TRM в титаномagnetитах в работе [Zhilyaeva, Petrova, Kudryavseva, 1976]. Авторы этих работ объясняют физическую природу этого явления магнито-статическим взаимодействием на границе минералогических фаз. Ими был также рассмотрен случай самообращения TRM в неравновесном твердом растворе, возникшем при регомонизации полностью распавшегося титаномagnetита в природных условиях. В более поздних работах сообщается о других случаях самообращения TRM в титаномagnetитах при их окислении [Peterbridge, 1977; Heller, Petersen, 1982; Hoffman, 1982 и др.]. В последнее время особый интерес вызывает исследование самообращения TRM у океанских базальтов, магнитные свойства которых определяются, в основном, однофазно и гетерофазно окисленными титаномagnetитами [Nishida, Sasajima, 1974; Petersen, Blie, 1973; Ryall, Hall, 1979; Tucker, O'Reilly, 1980].

В ряде работ для того, чтобы понять, на какой стадии развития твердого раствора имеет место явление самообращения TRM, производилось экспериментальное моделирование процесса окисления природных слабоокисленных титаномagnetитов. Так авторами работы [Ryall, Hall, 1979] самообращение TRM было обнаружено при нагреве океанских базальтов при 150°C в соответствующей природным условиям среде через 3023 часа. В титаномagnetитах, содержащихся в базальтах, произошло изменение температуры Кюри T_c от 175 до 322°C и параметра окисления γ от 0.1 до 0.74 , что указывает на гетерофазное окисление титаномagnetитов. В работе [Tucker, O'Reilly, 1980] изучалось самообращение TRM на синтезированных титаномagnetитах ($\text{Fe}_{2.4}\text{Ti}_{0.6}\text{O}_4$). Предварительно производился нагрев титаномagnetитов при температуре 1275°C в среде, приближенной к природной, и достигалось гетерофазное окисление титаномagnetитов. Для разных образцов величина параметров окисления γ изменялась от 0.15 до 0.6 . Область отрицательных значений TRM находилась в температурном интервале от

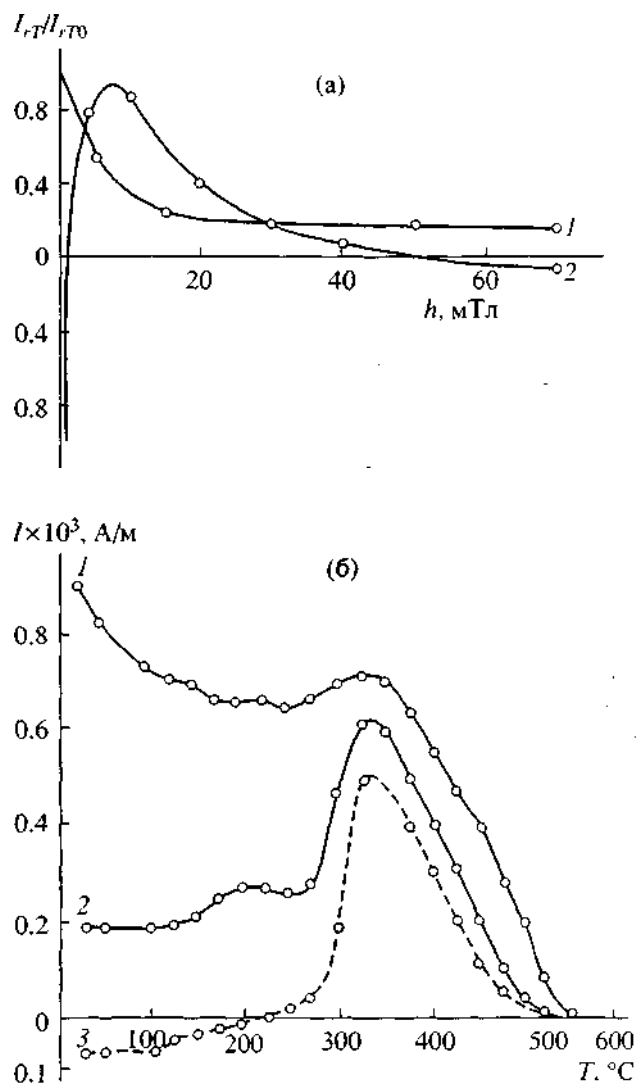


Рис. 3. Изменение термонамагниченности под действием термообработки образца и воздействия переменного магнитного поля (рудный оливинит месторождения Лесная сопка, Кольский полуостров), (а) - размагничивание образца с I_r в переменном магнитном поле h : 1 - после 2-го нагрева; 2 - после 9-го нагрева; (б) - моделирование I_r : 1 - охлаждение после 1-го нагрева образца от 625°C до T_c в $H_c = 0.5$ мТл; 2 - охлаждение после 7-го нагрева; 3 - охлаждение после 9-го нагрева (при 325°C H_c отключено).

20 до 300°C . Авторы этих работ сделали вывод, что самообращение TRM связано с отрицательным магнито-статическим взаимодействием фаз, возникших в результате гетерофазного окисления.

Суммируя данные экспериментов, можно сказать, что самообращение TRM имеет место на титаномagnetитах определенного состава, образовавшегося на определенной стадии их эволюции.

Таблица

№ образца	I_n , А/м	$k_0 \cdot 10^{-3}$, ед. СИ	T_{B1} , °C	T_{B2} , °C	До нагрева				
					H_{cr0} , мТл	H'_{cr0} , мТл	H'_{cr0} / H_{cr0}	I_{rs0} , А/м	I_{rs0} / I_s
29/1(1)	1.77	2.05	280	310					
29/1(2)	2.20	2.05	250	420	44	50	1.14	102	0.40
34/2(1)	8.73	1.95	450						
34/2(2)	7.11	1.33			44	52	1.20	163	0.36
21/6(1)	6.70		238	320	78	79	1.01	160	
21/16			195	480		60		210	
После нагрева								После выдержки при 350°C в течение 1 часа	
№ образца	H'_{cr1} , мТл	H'_{cr1} / H_{cr1}	H_{cr1} , мТл	I_{rs1} , А/м	I_{rs1} / I_{rs0}	H_{cr1} / H_{cr0}	H_{cr2} , мТл	H_{cr2} / H_{cr1}	
29/1(2)	17		16	240	2.35	0.36			
34/2(1)	24	1.10	22	165					
21/6(1)	110	0.98	112	106	0.66	1.42	97	0.87	
21/16			22	120					

Примечание. I_n – естественная остаточная намагниченность; k_0 – начальная магнитная восприимчивость; T_{B1} и T_{B2} – температуры блокирования первого и второго нагревов; H_{cr0} , H_{cr1} , H_{cr2} – остаточно-коэрцитивные силы до, после первого нагрева и после прогрева при 350°С в течение 1 часа; H'_{cr0} , H'_{cr1} – величина, равная полю, в котором $I_r = 0.5I_{rs}$, соответственно, до, после первого нагрева; I_s – намагниченность насыщения; I_{rs0} и I_{rs1} – остаточные намагниченности насыщения до и после первого нагрева.

В работах [Жиляева, Колесников, Петрова, 1970; Жиляева и др., 1971; Барсанов и др., 1974; Жиляева, Кудрявцева, 1974; Трухин и др., 1984; Трухин и др., 1989] исследовалось самообращение TRM природных ферришпинелидов разного состава (магнезиальные аналоги титаномагнетитов Сибири и Кольского полуострова, магнетиты Ковдора (Кольский п-ов), титаномагнетиты, содержащиеся в траппах Якутии). На основе микронного анализа удалось установить, что в них существует такое катионное распределение по подрешеткам, при котором имеет место точка компенсации T_k , т.е. состав с суммарным магнитным моментом близким к нулю. Авторами был предложен механизм, в котором предполагалось, что ответственным за самообращение TRM образцов с наличием T_k является обменное взаимодействие в неравновесном твердом растворе с единым анионным каркасом, включающим и со-

став с $M = 0$ [Жиляева, Колесников, Петрова, 1970].

Интересно отметить, что при размагничивании образца, в котором была создана обратная PTRM, переменным магнитным полем h , уже в полях $h > 1$ мТл выявилась положительная компонента, по величине сравнимая с отрицательной PTRM (рис. 3а). Это частичное самообращение, в результате которого появилась обратная PTRM, имеет место на определенной стадии регомогенизации твердого раствора (рис. 3б, кривая 3), после девятого цикла нагрев-охлаждение (20–625–20°С) в поле $H = 0.5$ мТл.

Как известно, роль немагнитных катионов могут выполнять вакансии в случае титаномагнетитов при однофазном окислении титаномагнетитов. Возможность существования в таких титаномагнетитах составов, имеющих точки компенсации T_k , была показана теоретически [Verhoogen, 1962]. Эти слу-

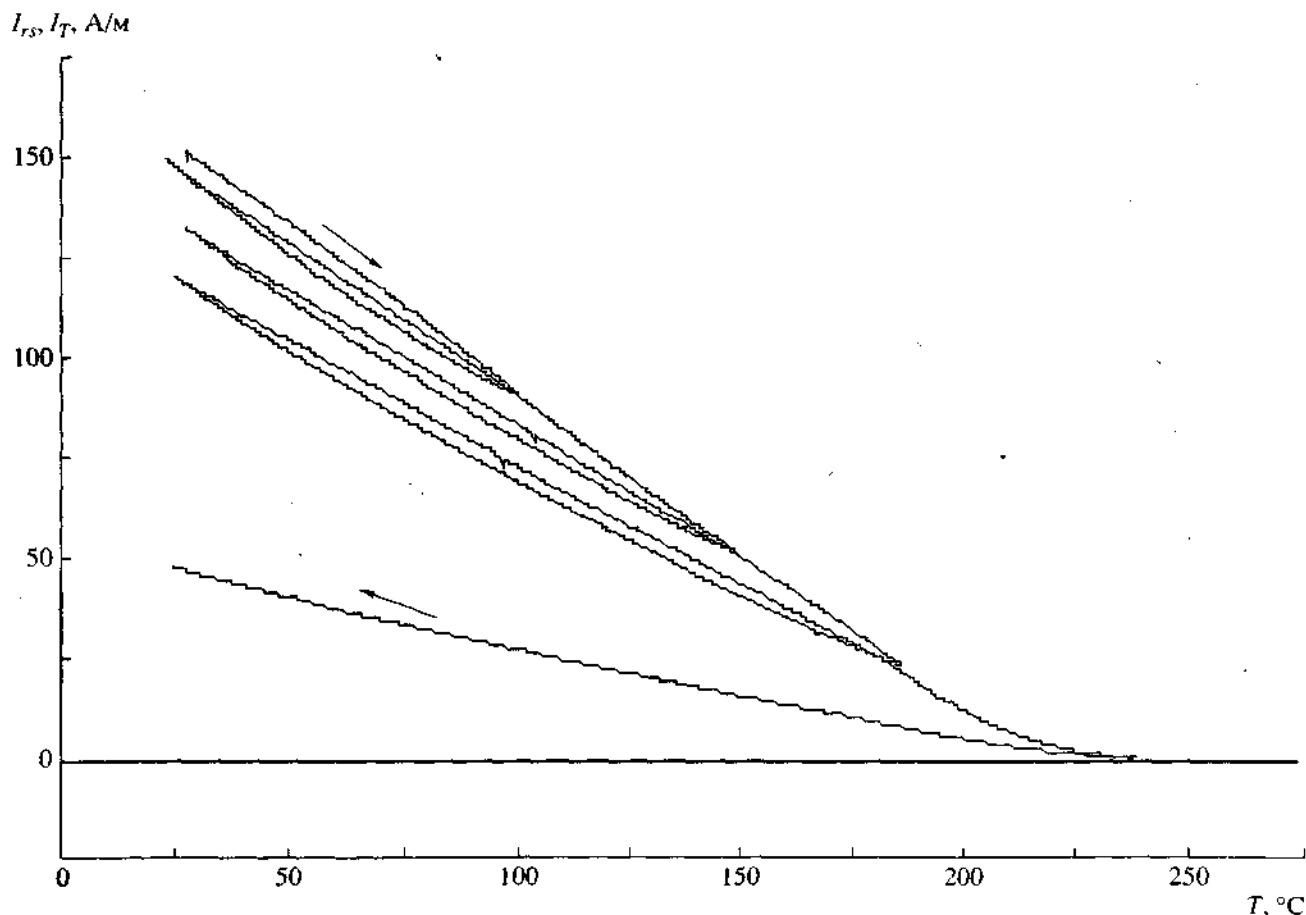


Рис. 4. Циклическое терморазмагничивание образца 21/6(1), намагниченного до насыщения (I_{rs}), и получение термо-намагниченности I_T в поле 0.1 мТл. После отключения поля $I_{rT} = I_T$.

чаи экспериментально получены как на титаномагнетитах из базальтов, так и на синтезированных аналогах.

В подводных базальтах, магнитные свойства которых определяются титаномагнетитами, нами обнаружено, что базальты из зон с повышенными напряжениями легко подвергаются окислению при достаточно низких температурах, и они имеют признаки самообращения TRM на определенной стадии окисления (хребет Шписс-область вблизи разлома Буве) [Трухин и др., 2000]. Обратная термоостаточная намагниченность была получена в результате лабораторного нагрева образца, имеющего изначально достаточно низкую температуру блокирования $T_b = 195^\circ\text{C}$. В этом образце осуществлялось моделирование PTRM при охлаждении от 300°C в поле $H = 0.05$ мТл и показало аномальный характер зависимости $I_n(T)$.

САМООБРАЩЕНИЕ TRM НА ТИТАНОМАГНЕТИТАХ ПОДВОДНЫХ БАЗАЛЬТОВ

Исследованные образцы базальтов драгированы с морского дна из трансформного разлома Романш (Центральная Атлантика) и из точки тройственного сочленения Буве в районе хребта Шписс (Южная Атлантика). Зона трансформного разлома Романш протягивается примерно вдоль экватора от берегов Африки до Южной Америки и имеет раздвиговую составляющую. Тройственная точка Буве представляет собой место сочленения Южно-Американской, Африканской и Антарктической литосферных плит в районе 55° ю.ш. и 0° в.д.

Терромагнитные измерения проводились на вибрационном терромагнитометре. Принцип действия основан на явлении электромагнитной индукции. Вибрация образца происходит соосно индукционному датчику, охлаждающей рубашке, печи и соленоиду. Сигнал с датчика после усиления и

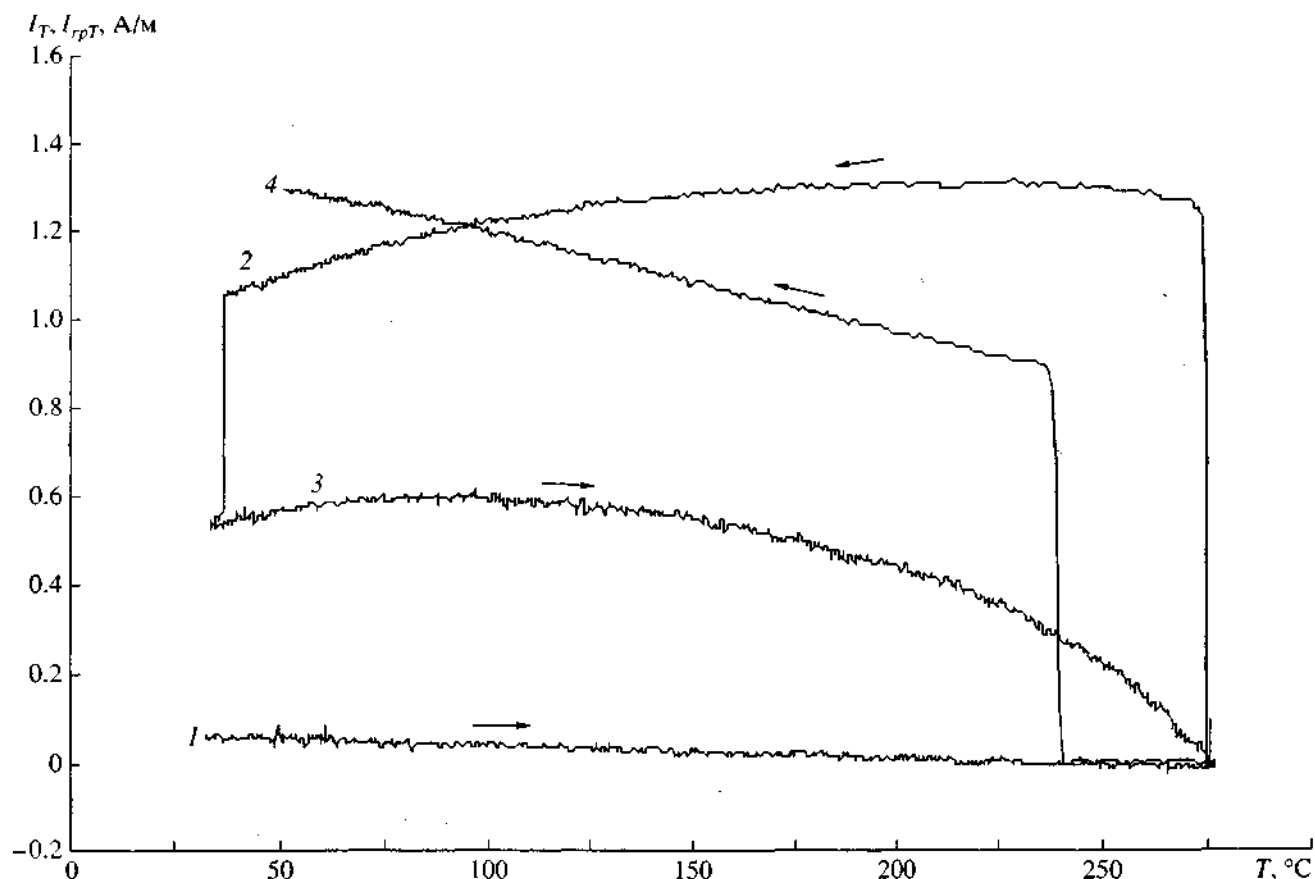


Рис. 5. Кривые $I(T)$ и I_{TT} образца 29/1(1): 1 – нагрев в отсутствие внешнего поля до температуры T_B (280°C); 2 – охлаждение в поле 0.15 мТл; 3 – нагрев в отсутствие внешнего поля до T_B ; 4 – охлаждение от T_B до 240°C без поля, далее в поле 0.15 мТл до комнатной температуры.

детектирования поступает на развертку У-оси. Температура контролируется хромель-копелевой термопарой, находящейся в непосредственном контакте с образцом. Второй спай термопары находится в дьюаре со льдом. Сигнал термопары поступает на развертку Х-оси. Установка обеспечивает измерение магнитного момента с автоматическим выводом данных в компьютер через интерфейс L-154 в диапазоне от 1.3×10^{-3} до 5.45×10^{-4} А/м².

Эксперименты по самообращению проводились на трех образцах: образцы 29/1(1) и 34/2(1) из трансформного разлома Романш и образец 21/6(1) близ трансформного разлома Буве.

Носителями ферромагнитных свойств образцов были титаномagnetиты, находящиеся на разных стадиях низкотемпературного окисления.

С целью выяснения свойств самообращения намагниченности у образцов, основное внимание было уделено термомагнитным исследова-

ниям. Данные о магнитных характеристиках образцов до и после нагрева приведены в таблице. Данные для образцов, на которых изучалось самообращение, подчеркнуты, остальные данные для сходных образцов тех же драг приведены для сравнения.

Идея работы состояла в том, чтобы для нескольких близких по составу образцов (с близкими точками Кюри), проявляющих хотя бы частичное самообращение, провести серию сходных экспериментов с целью установления возможных причин самообращения термоостаточной намагниченности, как общих для всех образцов, так и зависящих от особенностей данного образца.

В ряде работ [Ryall, Hall, 1979; Трухин и др., 1997] было замечено, что образцы, на которых проявлялось явление самообращения, имели T_c или T_c в районе $300 \pm 50^\circ\text{C}$. Это позволило предположить, что механизм самообращения реализуется на титаномagnetитах определенного со-

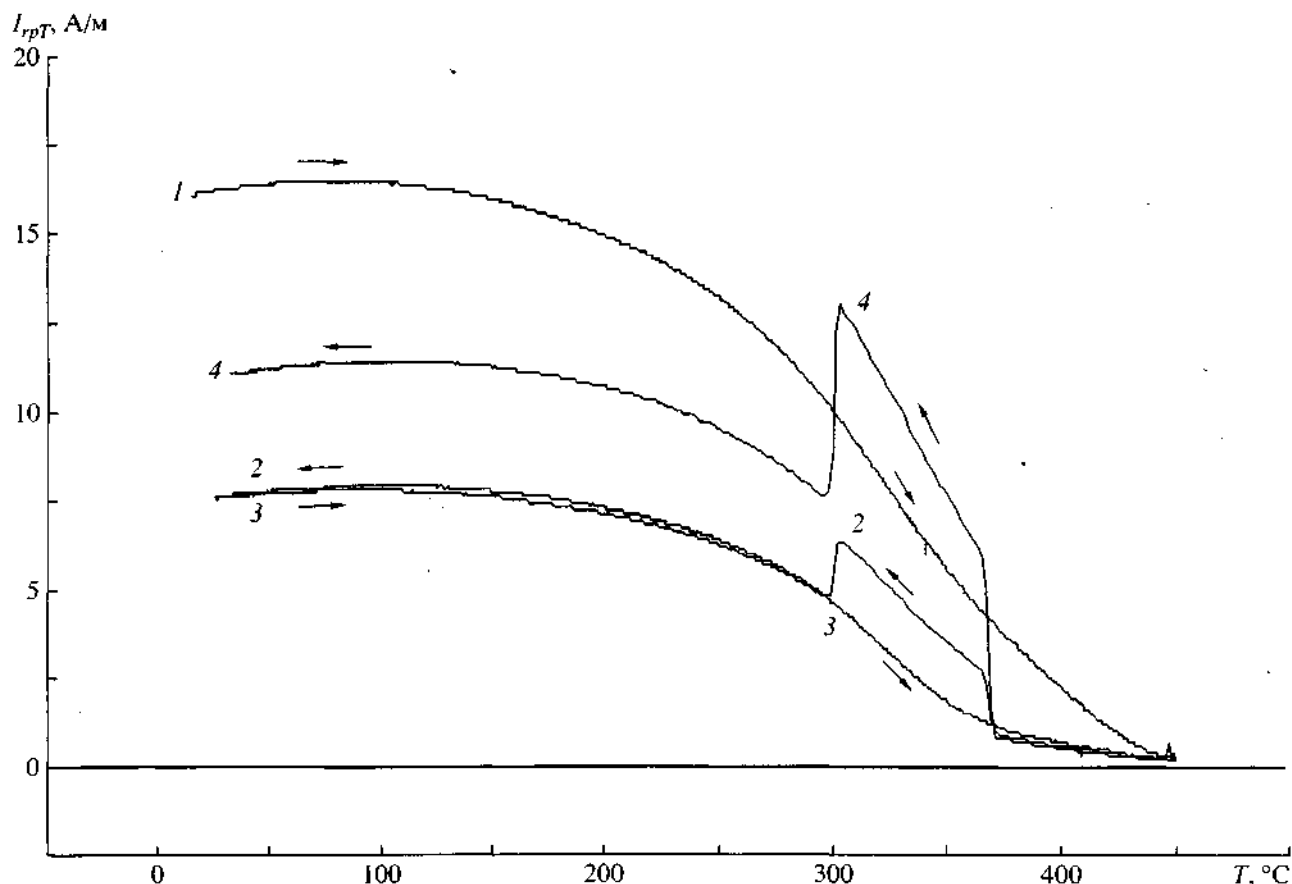


Рис. 6. Получение парциальной термоостаточной намагниченности I_{pT} образца 34/2(1): 1 – нагрев без поля из состояния I_{pT} , полученной в поле 0.15 мТл; 2 – охлаждение в интервале от 370°C до 300°C в поле 0.15 мТл; 3 – нагрев без поля; 4 – охлаждение в интервале от 370°C до 300°C в поле 0.5 мТл.

става, который достигается на соответствующей стадии окисления. Поэтому для нашего исследования были отобраны образцы, имеющие T_g приблизительно в указанном диапазоне температур.

Для образца 21/6(1) был проведен эксперимент по циклическому терморазмагничиванию остаточной намагниченности насыщения I_{rs} (рис. 4) – кривые охлаждения имеют обычный вид. Не выявлено также никаких особенностей и на кривой образования TRM в поле 0.1 мТл (рис. 5). Данные, полученные при термомагнитных исследованиях образца 29/1(1), представлены на рис. 5. Видно, что при образовании полной термонамагниченности TRM (кривая 2), с уменьшением температуры от 275°C происходит уменьшение намагниченности, а при получении парциальной термоостаточной намагниченности PTRM в диапазоне 240–20°C происходит увеличение PTRM (кривая 4). Для проверки упомянутого выше предположения о том, что самообращение титаномagne-

титов происходит в определенном температурном интервале, для всех изучаемых образцов были получены парциальные термонамагниченности в различных температурных интервалах (рис. 6, рис. 7, рис. 8). Образец 34/2(1) не обнаружил каких-либо особенностей (рис. 6), тогда как для двух других образцов ярко выраженное усиление эффекта самообращения получалось в результате парциального намагничивания в интервале 300–260°C (рис. 7, рис. 8).

Подтверждением того, что возможной причиной самообращения является наличие некоего определенного фазового состава, являются данные эксперимента на образце 21/6(1) (рис. 8). В эксперименте на образце 21/6(1) создавались TRM и PTRM в различных температурных интервалах в поле 0.1 мТл, а затем они терморазмагничивались (рис. 8). На кривых четко виден аномальный ход кривых термонамагничивания в процессе охлаждения и нагрева. Для объяснения этого явления можно предложить две версии:

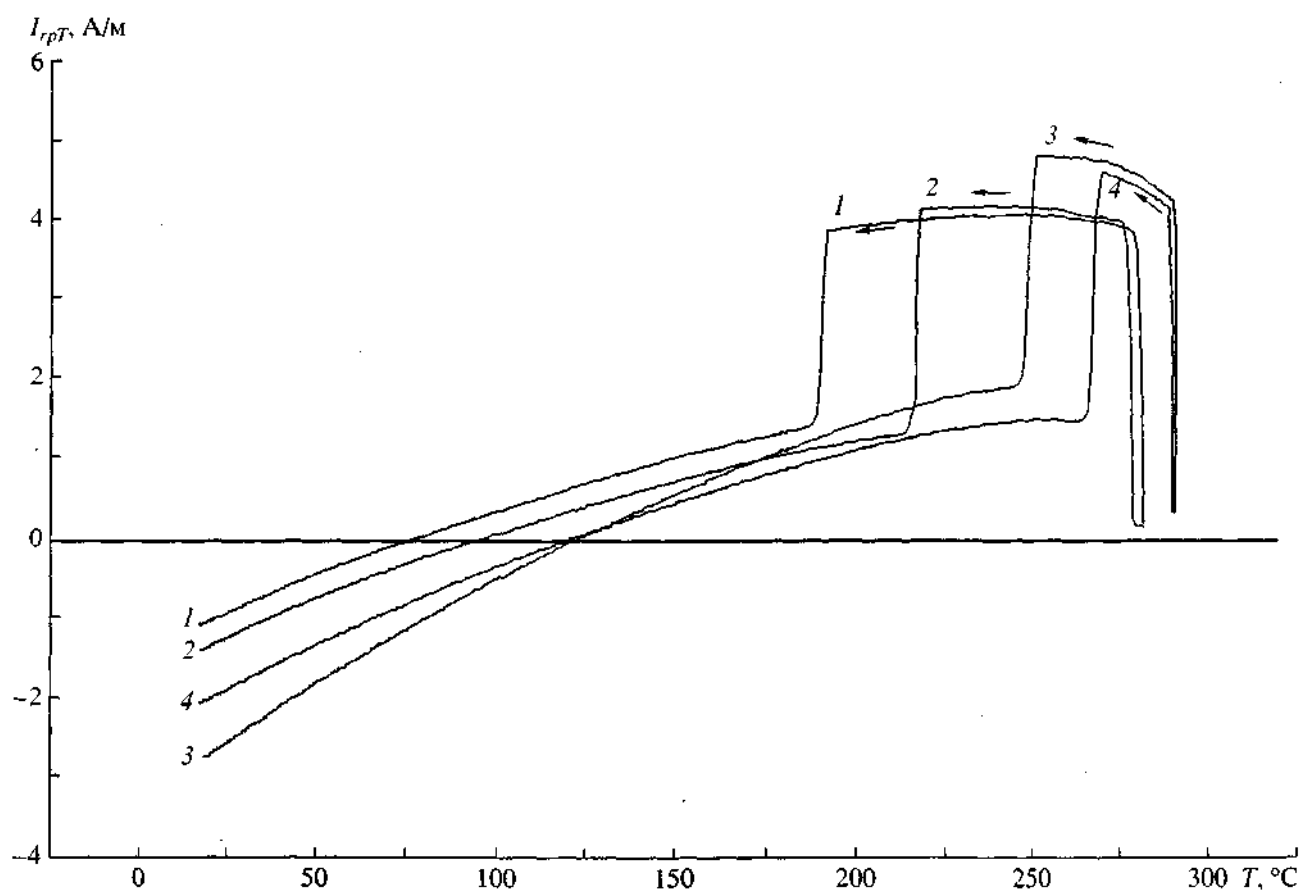


Рис. 7. Кривые получения парциальной термоостаточной намагниченности I_{pT} (образец 29/1(1)): 1 – охлаждение в поле 0.5 мТл от 280°C до 200°C, далее без поля; 2 – охлаждение в поле 0.5 мТл от 280°C до 235°C, далее без поля; 3 – охлаждение в поле 0.5 мТл от 290°C до 250°C, далее без поля; 4 – охлаждение в поле 0.5 мТл от 290°C до 270°C, далее без поля.

либо эффект самообращения связан со вновь образованной в результате повторного нагрева высокотемпературной фазой, либо это свойство определенного состава титаномагнетита, образованного на данной стадии окисления. Подтверждение одного из предположений можно было бы получить, переведя весь образец во вторую, более окисленную фазу. С этой целью был проведен длительный прогрев образца при 350°C (в течение 1 ч). Моделирование термонамагниченности (рис. 9), судя по относительному спаду на кривых охлаждения, показало небольшое увеличение эффекта самообращения после прогрева. Следовательно, предположение о том, что эффект самообращения связан с некоторой высокотемпературной фазой, более вероятно.

Из анализа параметров коэрцитивности образца 21/6(1) можно сделать вывод, что в результате первого нагрева произошло окисление об-

разца – коэрцитивность повысилась: $H_{cr1} > H_{cr0}$ (таблица), а после отжига при температуре 350°C над процессом дальнейшего окисления преобладал процесс отжига напряжений. В результате – коэрцитивность понизилась: $H_{cr2} < H_{cr1}$ (таблица).

На рис. 10 изображены кривые нагрева образца 21/6(1) в слабом поле 0.5 мТл. Видно, что после длительного прогрева (рис. 10, кривая 2) пик Гопкинсона имеет более узкую форму, чем до прогрева (рис. 10, кривая 1), а также произошел сдвиг пика в более высокотемпературную область.

Эти результаты дают основание предположить, что после длительного прогрева фазовый и структурный составы титаномагнетита изменились. При этом, по всей вероятности, фазовые изменения идут в направлении формирования составов ферромагнитной фракции с T_c . Если бы формировался двухфазный состав, то пик

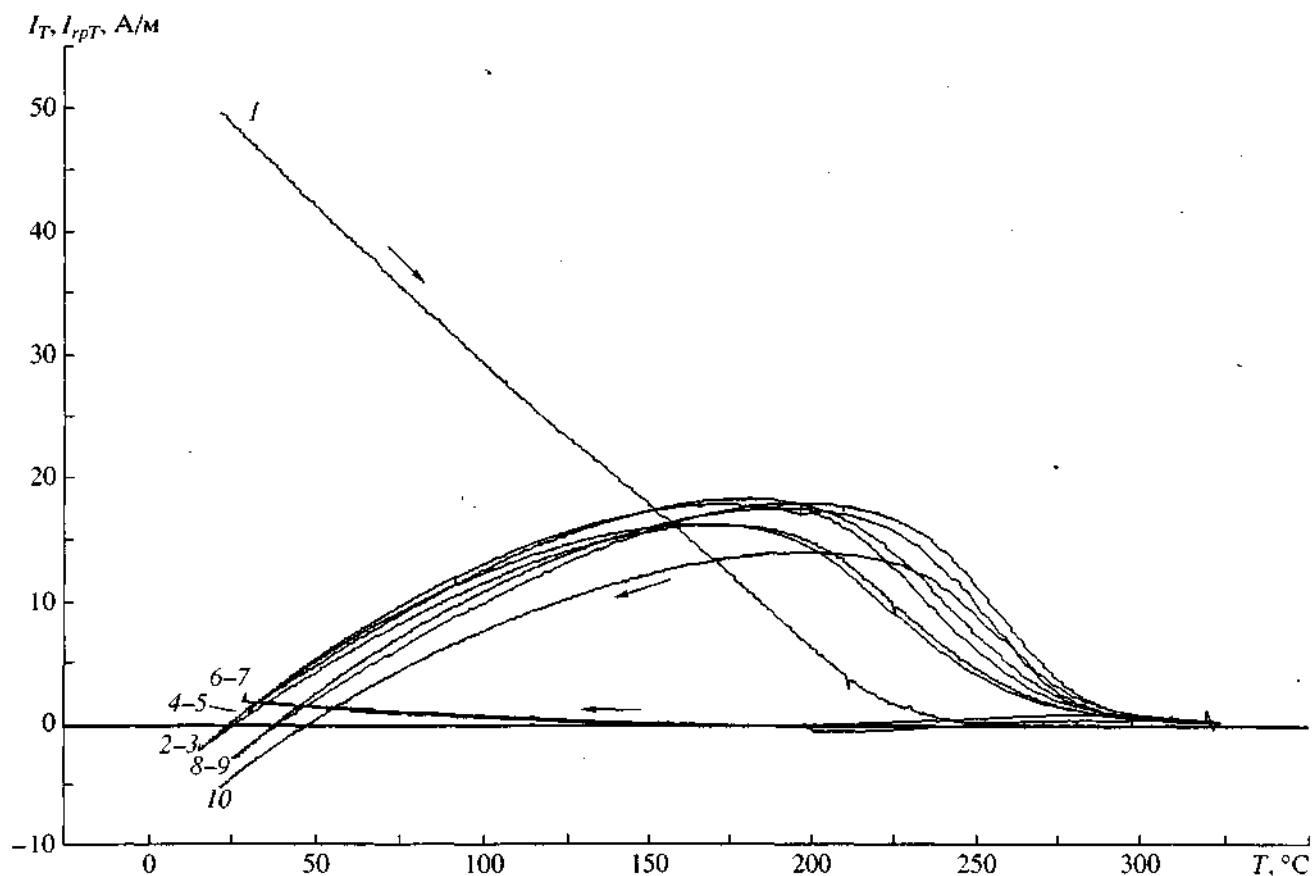


Рис. 8. 1 – Терморазмагничивание образца 21/6(1) с I_{rT} , полученной в поле 0.1 мТл; 2 – охлаждение (получение I_{rT}) в поле 0.1 мТл; 3, 5, 7, 9 – нагрев без поля; 4 – получение I_{rT} в поле 0.1 мТл в интервале от T_B до 200°C; 6 – получение I_{rT} в поле 0.1 мТл в интервале от 200°C до комнатной температуры; 8 – получение I_{rT} в поле 0.1 мТл в интервале от T_B до 245°C; 10 – получение I_{rT} в поле 0.1 мТл в интервале от 300°C до 260°C.

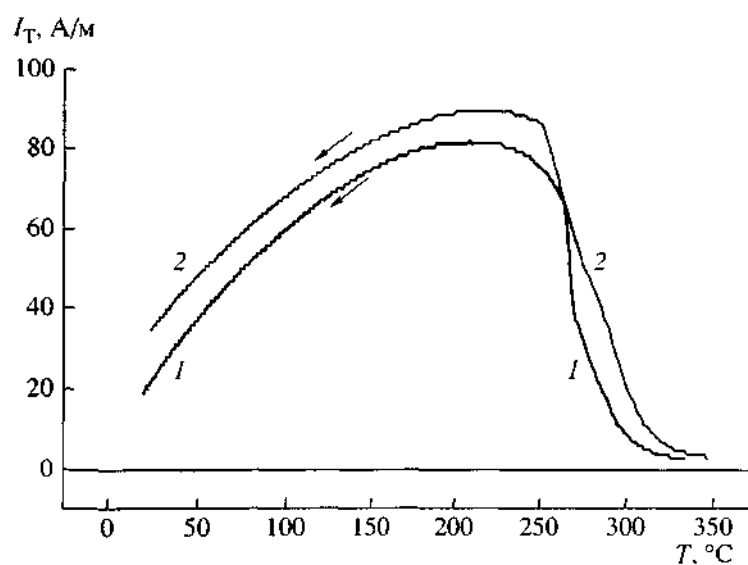


Рис. 9. Моделирование термонамагниченности. Охлаждение образца 21/6(1) в поле 0.5 мТл: 1 – до длительного прогрева; 2 – после выдержки образца в течение 1 часа при 350°C.

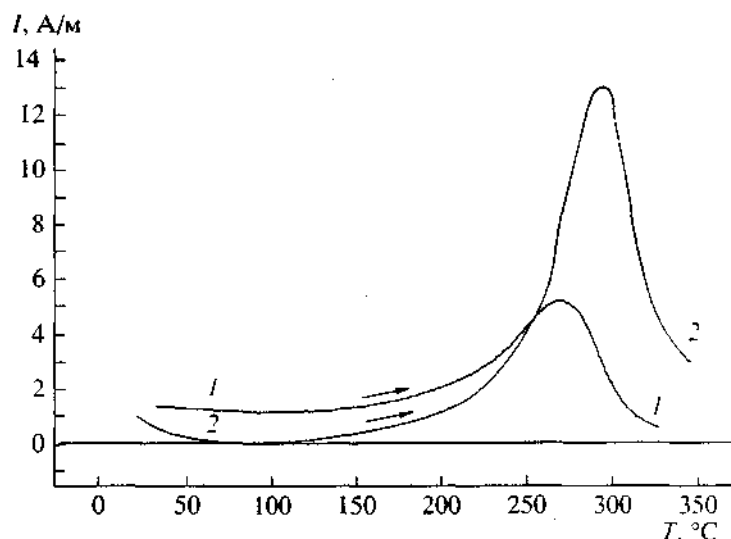


Рис. 10. Пики Гопкинсона на кривых $I(T)$, полученных при нагревании образца 21/6(1) в поле 0.5 мТл. 1 – до длительного прогрева; 2 – после того, как образец был отожжен при температуре 350°C в течение 1 ч.

Гопкинсона после нагрева был бы более широким, чем до нагрева, либо даже раздвоенным.

ВЫВОДЫ

1. Анализ физических механизмов самообращения намагниченности, проведенный нами на основании наших работ и работ других авторов, показывает, что наиболее вероятным механизмом, в соответствии с которым происходит самообращение намагниченности на природных ферритмагнетиках, является предложенный для горных пород еще Неелем механизм смены знака I_s в доменах при прохождении ими точки компенсации T_k в процессе охлаждения ферритмагнетика. Однако, в принципе мы не исключаем возможности существования в природе и других механизмов самообращения, в том числе связанных с магнитостатическим или обменным взаимодействиями на границах минералогических фаз.

2. В наших исследованиях явлений самообращения на континентальных горных породах мы обнаружили случаи, когда эти явления определенно были связаны с неелевым механизмом смены знака I_s в доменах. Это наблюдалось на титаномагнетитах траппов Якутии, пикроильменитах (аналоги гемоильменитов) кимберлитов Якутии и ферришпинелидах Кугды (Красноярский край), Ковдора и Лесной сопки (Кольский полуостров).

3. Нами также были проведены эксперименты на образцах океанских базальтов, драгированных в районах подводного хребта Шписс (Атлантика), трансформного разлома Романш и тройственного

сочленения Буве (Центральная и Южная Атлантика). Было получено, что самообращение намагниченности скорее всего связано с одной определенной минералогической фазой, образующейся в подводных титаномагнетитах в результате процессов однофазного окисления. В этих случаях: также наиболее вероятный механизм наблюдавшегося самообращения – смена знака I_s в доменах: зерен титаномагнетитов при $T = T_k$ в процессе охлаждения от T_c до T_o .

4. По нашему мнению проблема реальность инверсий геомагнитного поля может быть решена путем изучения физических механизмов самообращения естественной остаточной намагниченности континентальных и океанских горных пород. Если окажется, что вероятность образования природных составов основных ферритмагнитных минералов (титаномагнетиты, гемоильмениты) со свойствами смены знака I_s в доменах очень велика, то тогда можно говорить о малой вероятности существования инверсий геомагнитного поля, определяемых при палеомагнитных исследованиях на основе данных о смене знака естественной остаточной намагниченности в горных породах. При этом смена знака I_s в доменах может происходить как при изменении температуры (наличие T_k), так и при диффузии катионов между подрешетками, т.е. в результате химических процессов. Механизмы, связанные с такой сменой знака I_s в доменах, по-видимому, могут осуществляться в осадочных горных породах.

Естественно, что если вероятность образования природных ферритмагнетиков, обладающих

свойством самообращения намагниченности, будет очень малой, то тем самым будет определено доказана реальность геомагнитных инверсий.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ: грант № 02-05-64274.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барсанов Г.П., Жилева В.А., Кудрявцева Г.П. Аномальное поведение термоостаточной намагниченности в ишкулите // Изв. АН СССР. Сер. Геология. 1974. № 11. С. 99-105.
- Грабовский М.А., Пушков А.Н. К вопросу о возникновении термоостаточной намагниченности обратной полярности в горных породах // Изв. АН СССР. Сер. геофизическая. 1954. № 4. С. 320-330.
- Жилева В.А., Колесников Л.В., Петрова Г.Н. О частичном самообращении термоостаточной намагниченности природных ферритмагнетиков ряда FeFe_2O_4 - Fe_2TiO_4 - Mg_2TiO_4 // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1970. № 10. С. 59-71.
- Жилева В.А., Колесников Л.В., Петрова Г.Н., Тихонов Л.В. Самообращение в магнетиальных титаномagnetитах и его физическая природа // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1971. № 6. С. 48-56.
- Жилева В.А., Кудрявцева Г.П. Самообращение термоостаточной намагниченности при неполной гомогенизации структур распада твердого раствора FeFe_2O_4 - MgAl_2O_3 // Геомагнетизм и аэрономия. 1974. Т. XIV. № 4. С. 715-720.
- Нагата Т. Магнетизм горных пород. М.: Мир. 1965. 346с.
- Трухин В.И., Багин В.И., Булычев А.А. и др. Магнетизм срединно-океанического хребта Шписс (Южная Атлантика) // Физика Земли. 2000. № 2. С. 68-82.
- Трухин В.И., Жилева В.А., Катеренчук А.В. и др. Магнетизм пород из кимберлитовых трубок Якутии // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1984. № 9. С. 57-70.
- Трухин В.И., Жилева В.А., Саврасов Д.И. и др. Самообращение термоостаточной намагниченности горных пород кимберлитовых трубок Якутии // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1984. № 11. С. 78-89.
- Трухин В.И., Жилева В.А., Зинчук Н.Н., Романов Н.Н. Магнетизм кимберлитов и траппов. М.: Изд-во МГУ, физ. фак. 1989. 165 с.
- Трухин В.И., Жилева В.А., Томилин Е.Ф., Конилов А.Н. Особенности и возможный механизм самообращения TRM синтезированных гемоильменитов // Физика Земли. 1997. № 2. С. 52-59.
- Трухин В.И., Караевский С.Х. Особенности образования и свойства намагниченности, антипараллельной намагничивающему полю, в кимберлитах. М.: Изд-во МГУ, физ. фак. 1985. Препринт № 19/1985 физ. фак. МГУ. 1985. 4 с.
- Трухин В.И., Караевский С.Х. Самообращение намагниченности природных пикроильменитов. М.: Изд-во МГУ, физ. фак. 1996. 56 с.
- Dunlop D., Ozdemir O. Rock Magnetism. Fundamental and frontiers. // Cambridge university press. 1997. 573p.
- Heller F., Petersen N. Self-reversal explanation for the Laschamp. Olby geomagnetic field excursion // Phys. Earth. Planet. Int. 1982. V. 30. P. 358-372.
- Hoffman K.A. Partial self-reversal in basalts containing mildly low-temperature oxidized titanomagnetite // Phys. Earth. Planet. Int. 1982. V. 30. P. 357.
- Jacobs J.A. Reversals of the Earth's Magnetic Field. 1994. 339p.
- Neel L. L'inversion de L'aimantation permanente des rocks // Ann. Geophys. 1951. V. 7. № 2. P. 90-103.
- Nishida /., Sasajima S. Examinations of self-reversal due to W-type magnetization in basalt // Geophys. J. 1974. V. 37. № 3. p. 453-460.
- Ozima M., Oshima O., Funaki M. Magnetic properties of pyroclastic rocks from the later stage of the eruptive activity of Haruna Volcano in relation to the self-reversal of thermoremanent magnetization // Earth Planet Space. 2003. V. 55. P. 183-188.
- Peterbridge J. A Magnetic coupling occurring in partial self-reversal of magnetism its association with increased magnetic viscosity in basalts // Geophys. J. R. Astr. Soc. London. 1977. V. 50. №2. P. 395-406.
- Petersen N., Bleil U. Self reversal of remanent magnetization in synthetic titanomagnetites // J. Geophys. 1973. Bd. 39. H. 6. P. 965-977.
- Prevot M., et all. The mechanism of self-reversal of thermoremanence in natural hemoilmenite crystals. New experimental data and model // Phys. the Earth and Pl. Int. 2001. V. 126. № 1-2. P. 75-92.
- Ryall P.J.C., Hall J. Laboratory alteration of titanomagnetites in submarine pillow lavas // Canad. J. Earth. Sci. 1979. V. 16. № 3. Pt. 1. P. 496-505.
- Tucker P., O'reilly W. Reversed thermoremanent magnetization in synthetic titanomagnetites as a consequence of high temperature oxidation // J. Geomag. Geoelectr. 1980. V. 32. P. 341-355.
- Verhoogen I. Ionic ordering and self-reversal of magnetization in impure magnetites // J. Geophys. Res. 1956. V. 61. № 2. P. 201-210.
- Verhoogen I. Oxidation of iron-titanium oxides in igneous rocks // J. Geology. 1962. V. 70. № 2. P. 168-181.
- Zhilyaeva V.A., Petrova G.P., Kudryavtseva G.P. Self-reversal of TRM in ferrosinels // Publ. Inst. Geoph. Pol. Ac. Sci. 1976. C-1. (102). P. 87-98.