

УДК 550.382.3

В. И. ТРУХИН

НЕРАВНОВЕСНЫЕ МАГНИТНЫЕ СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Статья посвящена изучению естественных магнитных состояний горных пород в их сопоставлении с нулевым исходным состоянием. Показано, что горные породы, как правило, находятся в неравновесных состояниях. Степень неравновесности зависит от температуры образования естественной остаточной намагниченности и от времени, прошедшего с момента образования пород.

Исследованию исходных магнитных состояний горных пород посвящено большое количество работ [1—3]. При интерпретации экспериментальных результатов авторы этих работ принимали во внимание только термическую активацию междоменных границ. Однако в последнее время выяснена существенная роль диффузионных процессов при намагничивании пород [4, 5]. В данной работе сделана попытка учета диффузионных процессов при изучении некоторых магнитных состояний изверженных и осадочных горных пород.

Термодинамически равновесным состоянием ферромагнетика при данной температуре T называется такое состояние, при котором достигнуто минимальное значение свободной энергии. При этом выполняется следующее условие:

$$\delta(E_A + E_k + E_\sigma + \dots + E_H) = 0, \quad (1)$$

где E_A — обменная энергия, E_k — магнитокристаллическая энергия, E_σ — магнитоупругая энергия, E_H — потенциальная энергия ферромагнетика во внешнем поле H .

Равновесное состояние доменной структуры в некотором поле H достигается не мгновенно, а за некоторое время t . Это время, как показали исследования, может изменяться от долей секунды до многих тысяч лет.

Во время достижения ферромагнетиком термодинамического равновесия наблюдается непрерывное изменение его магнитных характеристик, таких, как намагниченность I , остаточная намагниченность I_r , восприимчивость χ и т. п.

Однако постоянство во времени магнитных характеристик не является достаточным критерием равновесности ферромагнетика. Неравновесное состояние может быть «заморожено». Такая «замороженная»

неравновесность проявляется при статическом намагничивании. Например, кривая нормального намагничивания $I_r=f(H)$ после терморазмагничивания идет выше соответствующей кривой после размагничивания переменным магнитным полем, что свидетельствует о неравновесности первого состояния по сравнению со вторым [1, 8].

В принципе термодинамическое равновесие может быть достигнуто при любой температуре T , если система при каждой температуре будет выдерживаться бесконечно долго. В реальных опытах в лаборатории время выдержки такой термодинамической системы, как например, горная порода, ограничено разумными пределами. Поэтому, подвергая образец температурным и полевым воздействиям в течение ограниченного времени, мы, как правило, не наблюдаем в нем достижения равновесия. Образец горной породы может оказаться только в более или менее равновесном состоянии. Сравнительное изучение таких состояний дает дополнительную информацию о процессах намагничивания в горных породах, о магнитном последствии.

В данной работе изучалось терморазмагниченное, абсолютно нулевое состояние, (АНС) изверженных и естественное магнитное состояние (ЕМС) осадочных горных пород. Эти состояния сопоставлялись с размагниченным в переменном поле нулевым состоянием (НС) соответствующих пород.

Объекты изучения. АНС изучалось на четырех образцах титаномагнетитовых лав Камчатки, двух образцах порошкового магнетита с размером зерен 63μ и одном образце массивного гематита (I группа образцов). ЕМС было изучено на четвертичных осадочных породах, отобранных в Алтайском крае. Породы представляют собой суглинки и погребенные почвы (II группа образцов).

Для первой группы образцов эксперимент ставился следующим образом. Охлаждением при $H=0$ от 600°C до комнатной температуры T_h достигалось терморазмагниченное состояние (АНС). В этом состоянии измерялась начальная магнитная восприимчивость χ_0 , затем снимались кривые нормального намагничивания $I_r=f(H)$ до $H=200$ эрст и вязкого намагничивания $I_r=f(\lg t)$ в поле $H=6$ эрст. Максимальное время выдержки в поле было 10^4 сек. После этого образцы размагничивались в переменном магнитном поле \tilde{H} (максимальное $\tilde{H}=700$ эрст). Из полученного НС снова снимались соответствующие кривые $I_r=f(H)$, $I_r=f(\lg t)$ и измерялась χ_0 . Сопоставление этих кривых позволяло судить о неравновесности АНС по сравнению с НС.

Под воздействием переменного поля на всех образцах наблюдался спад $\chi_{\text{необр}} = \frac{I_r}{H}$ и χ_0 (рис. 1 и 2). Это свидетельствовало о том, что АНС является менее равновесным состоянием, чем НС. Такая метастабильность АНС, согласно Киренскому и др. [8], объясняется тем, что при охлаждении от высоких температур возникает большее число зародышей перемагничивания, чем при размагничивании в \tilde{H} . Это связано с тем, что при понижении T от температуры Кюри рост коэрцитивной силы происходит медленнее, чем увеличение спонтанной намагниченности I_s .

Зародыши перемагничивания появляются под действием внутренних полей рассеяния (H_p), возникающих на пустотах, немагнитных включениях, границах зерен и т. п. и обусловленных величиной I_s . При дальнейшем снижении T некоторые зародыши «замораживаются» и сохраняются при комнатной температуре. Дополнительное число «замороженных» зародышей обуславливает сравнительно большие вели-

чины $\kappa_{\text{необр}}$ и κ_0 . Под действием \tilde{H} некоторые неустойчивые зародыши, образовавшиеся при повышенных температурах, исчезают. Поэтому наблюдается уменьшение κ и I_r .

Исследованные образцы обладают заметной магнитной вязкостью. (Вязкая остаточная намагниченность $I_{rv} = I_r(\lg t_2) - I_r(\lg t_1)$.) Коэффициенты магнитной вязкости $S_v = \frac{I_r(\lg t_2) - I_r(\lg t_1)}{I_r(\lg t_1) \lg t_2(t_1)}$ ($t_1 = 1$, $t_2 = 10^4$ сек), полученные из НС, не коррелируют со скоростью уменьшения $\kappa_{\text{необр}}$ и κ_0 под действием \tilde{H} (см. рис. 1 и 2). Это вполне понятно. Магнитная вязкость связана с диффузией точечных элементов кристаллической решетки [6], а неод-

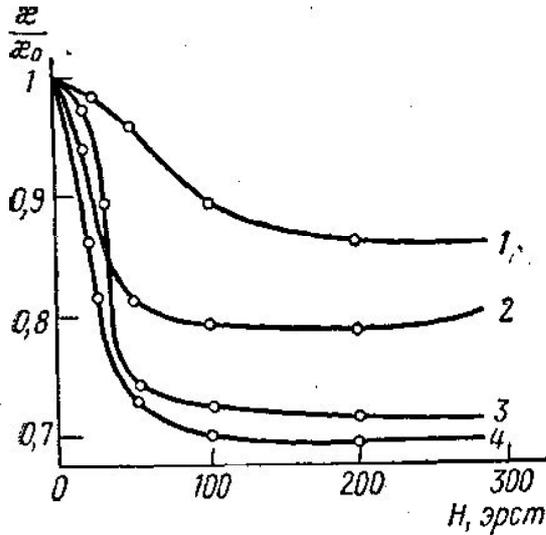


Рис. 1. Относительное изменение начальной восприимчивости под действием переменного магнитного поля (50 гц):

1 — образец № 66100, $S_v = 0,2$, 2 — МГ, $S_v = 0,05$, 3 — № 66133, $S_v = 0,4$, 4 — МГ, $S_v = 0$

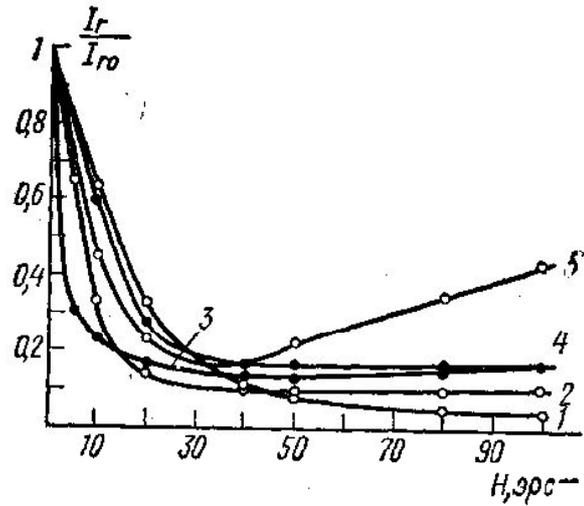


Рис. 2. Относительное изменение остаточной намагниченности, полученной в поле $H=100$ эрст из различных исходных состояний:

1 — $S_v = 0,2$, 2 — $S_v = 0,4$, 3 — $S_v = 0,05$, 4 — $S_v = 2,0$, 5 — $S_v = 0,09$

нородности, на которых возникают H_p , связаны с дефектами кристаллической решетки, размеры которых больше толщины доменных границ.

Таким образом, для первой группы исследованных образцов АНС менее равновесно по сравнению с НС для гистерезисных процессов намагничивания (для $\kappa_{\text{необр}}$, κ_0). При вязком намагничивании горных пород АНС получилось менее равновесным для образцов с малым значением S_v и более равновесным для образца с большим значением S_v . В таблице даны значения $S = S_v \cdot I_r(\lg t_1)$.

№ образцов	1751	66133	66900	66100	Магнетит	Гематит
$S_{\text{НС}}$	2,10	0,62	0,57	0,37	0,17	0,00
$S_{\text{АНС}}$	1,25	1,2	1,65	1,05	0,65	0,7
$S_{\text{АНС}}/S_{\text{НС}}$	0,6	1,95	2,9	2,95	3,5	∞

Такой результат указывает на связь коэффициента магнитной вязкости с коэффициентом диффузии D в ферромагнитных минералах горных пород. Очевидно, чем больше коэффициент диффузии D , тем быстрее будет достигнуто термодинамическое равновесие при данной температуре. Следовательно, более равновесное АНС образца 1751 по сравнению с другими при комнатной температуре должно быть связано с большим коэффициентом диффузии этого образца. Из прямых изме-

рений видно, что у него и существенно больший, чем у других образцов, коэффициент магнитной вязкости.

Таким образом, при комнатной температуре степень равновесности образца при одинаковой скорости охлаждения будет зависеть от величины коэффициента вязкости S . При малых S равновесие достигается, по-видимому, при более высоких температурах, где D и соответственно S достаточно велики. Охлажденный до T_K такой образец будет неравновесным. Поэтому воздействие \tilde{H} приводит его в более равновесное состояние. Хотя, вообще, воздействие \tilde{H} может вывести из состояния равновесия ту доменную структуру, которая находилась в равновесии при T_K [7]. Такой процесс увеличения неравновесности после воздействия \tilde{H} произошел с образцом 1751.

Согласно представлениям о диффузионной магнитной вязкости, развитым в ферромагнетизме [7], воздействие \tilde{H} на образец приводит к аккомодации магнитной восприимчивости, если перед действием \tilde{H} он находился в равновесном состоянии. Само равновесное состояние образца по оды пол чаается

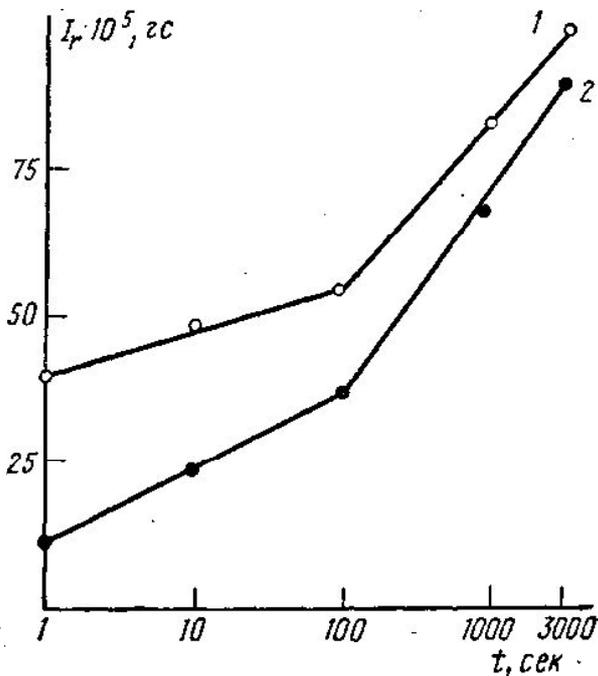


Рис. 3. Временные зависимости остаточной намагниченности I_r от $\lg t$, полученные из естественного магнитного состояния (1) и из состояния, размагниченного переменным полем (2).

при достаточно большой временной выдержке при $T = \text{const}$ и заключается в стабилизации доменных границ за счет диффузии примесей в кристаллической решетке. В связи с этим можно использовать очень длительную выдержку образцов, осуществленную в «природной лаборатории», т. е. на геологическом разрезе. Исследованная нами вторая группа образцов «была выдержана» несколько сот тысяч лет. Так как выдержка *in situ* происходит в слабом магнитном поле Земли ($H_3 \approx 0,5$ эрст), то образцы испытывались в более сильных магнитных полях (40 эрст). При такой постановке эксперимента можно считать, что стабилизация магнитной структуры минералов происходит практически в отсутствие магнитного поля. Сопоставление кривых $I_r(\lg t)$ показало, что естественное магнитное состояние (ЕМС) образцов II группы, как и предполагалось, является более равновесным, чем их НС. Типичные кривые $I_{r\text{ЕМС}}(\lg t)$ и $I_{r\text{НС}}(\lg t)$ приведены на рис. 3. Такие закономерности были получены на 42 образцах из 44 исследованных. Значения I_r (40 эрст) при действии H в течение $t = 1$ сек на всех образцах из НС получились меньшими, чем из ЕМС, т. е. ЕМС для гистерезисных процессов менее равновесно, чем НС. На первый взгляд такое неравновесие ЕМС непонятно. Ведь неравновесие АНС получалось за счет образования зародышей в полях рассеяния при повышенных температурах, а породы II группы, по геологическим данным, не подвергались существенным нагревам на протяжении своей истории. Однако вполне реально образование зародышей в течение геологической истории в результате магнитовязких

азца го ной по оды пол чаается при достаточно большой временной выдержке при $T = \text{const}$ и заключается в стабилизации доменных границ за счет диффузии примесей в кристаллической решетке. В связи с этим можно использовать очень длительную выдержку образцов, осуществленную в «природной лаборатории», т. е. на геологическом разрезе. Исследованная нами вторая группа образцов «была выдержана» несколько сот тысяч лет. Так как выдержка *in situ* происходит в слабом магнитном поле Земли ($H_3 \approx 0,5$ эрст), то образцы испытывались в более сильных магнитных полях (40 эрст). При такой постановке эксперимента можно считать, что стабилизация магнитной структуры минералов происходит практически в отсутствие магнитного поля. Сопоставление кривых $I_r(\lg t)$ показало, что есте-

процессов по направлению внутренних полей рассеяния. В этом смысле с точки зрения образования I_r , ЕМС будет идентично АНС. Если наше предположение о зародышеобразовании на осадочных породах правильно, то тогда становится более ясным механизм закрепления зародышей при создании АНС при повышенных температурах на изверженных породах. Закрепление зародышей, по-видимому, связано со стабилизацией междоменных границ в результате диффузионных процессов [7]. По-видимому, с такого же рода процессами должно быть связано и закрепление термоостаточной намагниченности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шолпо Л. Е., Яновский Б. М. Исследование остаточной намагниченности горных пород. Изд-во ЛГУ, 1968.
2. Шолпо Л. Е., Печников В. С. В сб.: «Настоящее и прошлое магнитного поля Земли». М., «Наука», 1965.
3. Шолпо Г. П., Шолпо Л. Е., Белоконь В. И., Кочегура В. В. В тр. Междувед. Геофиз. комитета. М., 1969.
4. Трухин В. И. В сб.: «Магнетизм горных пород и палеомагнетизм». М., изд. ИФЗ, 1969.
5. Трухин В. И. В сб.: «Магнетизм горных пород и палеомагнетизм 1968». М., изд. ИФЗ, 1969.
6. Seeger A., Kronmüller H., Rieger N. Untersuchung von Fehlstellen in ferromagnetischen Kristallen mit magnetischen Verfahren. Z. f. angew. Physik, 18, N 5/6, 1965.
7. Kneller E. Ferromagnetismus, Spr. Verl. Berlin, 1962.
8. Киренский Л. В., Дрокин А. И., Лаптей Д. А. Температурный магнитный гистерезис ферромагнетиков и ферритов. Новосибирск, 1965.

Поступила в редакцию
4.6 1970 г.

Кафедра
физики Земли