

УДК 550.382.3

МОДЕЛЬ ЯВЛЕНИЯ САМООБРАЩЕНИЯ НАМАГНИЧЕННОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

Н. С. Безаева, Т. В. Матвеева, В. И. Трухин

(кафедра физики Земли; кафедра компьютерных методов физики)

E-mail: trukhin@phys.msu.ru

Рассмотрена фундаментальная геофизическая проблема самообращения намагниченности горных пород, т. е. явления намагничивания горных пород антипараллельно намагничивающему полю. Представлена разработанная авторами физическая модель самообращения намагниченности и компьютерная реализация этой модели. Результаты моделирования имеют хорошее качественное соответствие с экспериментальными данными.

Введение

Палеомагнитные исследования показали [1], что примерно половина всех горных пород имеет естественную остаточную намагниченность (NRM), направленную антипараллельно направлению современного геомагнитного поля (ГМП). Согласно современным представлениям обратная NRM пород свидетельствует о переполюсовках (инверсиях) ГМП в прошлые геологические эпохи. Однако самообращение намагниченности также может быть причиной образования в природе обратной NRM. Поэтому изучение процесса и механизма самообращения является актуальной задачей современной геофизики.

Физические механизмы самообращения намагниченности горных пород впервые были теоретически рассмотрены Л. Неелем еще в 1951 г. [2]. Одним из предложенных им физических механизмов был механизм самообращения намагниченности, связанный со сменой знака спонтанной намагниченности вкрапленных в породу ферромагнитных минералов при их термонамагничивании в ГМП (механизм *N*-типа температурной зависимости спонтанной намагниченности).

Самообращение намагниченности горных пород экспериментально наблюдалось во многих лабораториях мира [3–4], в том числе самообращение было обнаружено одним из авторов статьи на кимберлитах и трапях Якутии [5–6] и на образцах подводных океанских базальтов [7]. Тем не менее на настоящий момент не существует единого мнения о механизме самообращения [3–7].

В настоящей статье приведены результаты исследований процессов и физического механизма самообращения намагниченности горных пород, представлена разработанная модель самообращения и ее компьютерная реализация. Проведено сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными [6].

Описание модели

Ферромагнитные минералы, входящие в состав горных пород, состоят из двух магнитных подре-

шеток, взаимодействие между которыми и внутри которых определяется константами молекулярного поля α , β [8]. Поэтому в качестве модели горной породы рассмотрен ансамбль однодоменных не взаимодействующих между собой ферромагнитных зерен с одной осью анизотропии и с одинаковыми и разными α , β . Зерна взяты одноосными и однодоменными, так как горные породы с одноосными однодоменными ферромагнитными вкраплениями часто встречаются в природе и являются основными носителями палеомагнитной информации.

Каждое зерно ансамбля представляет собой ферромагнетик типа *N* в классификации Л. Нееля, состоящий из двух неравноценных магнитных подрешеток *A* и *B*. Температурная зависимость спонтанной намагниченности такого ферромагнетика (рис. 1) рассчитана согласно теории коллинеарного ферромагнетизма Нееля [8]. В поле **H** каждое зерно намагничивается за счет вращения вектора спонтанной намагниченности I_S (теория Нееля определяет как величину, так и знак I_S) от направления вдоль оси легкого намагничивания к направлению **H** (рис. 2). Угол θ соответствует минимуму полной энергии зерна $E(\theta)$, представляющей собой сумму энергии одноосной анизотропии E_A и энергии зерна в магнитном поле E_H [7].

Намагниченность зерна определим как проекцию вектора I_S на направление внешнего магнитного по-

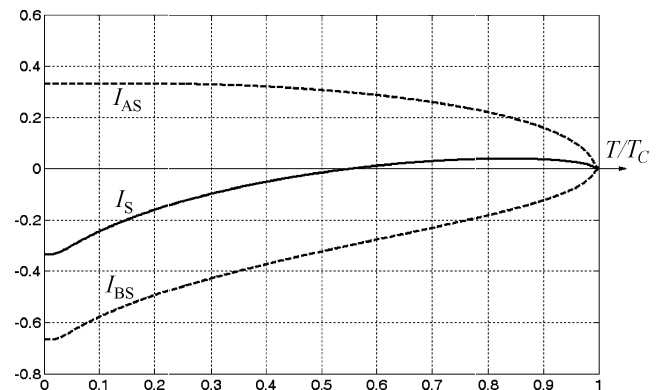


Рис. 1. Температурная зависимость спонтанных намагниченностей I_{SA} , I_{SB} подрешеток *A*, *B* соответственно и суммарной спонтанной намагниченности I_S ферромагнетика типа *N*

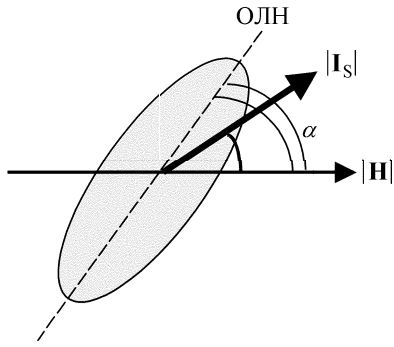


Рис. 2. Одноосное однодоменное ферромагнитное зерно во внешнем магнитном поле H

ля H , а намагниченность ансамбля зерен, как сумму соответствующих проекций I_S отдельных зерен.

Построенная при этих условиях модель хорошо описывает температурный диапазон от $T > 0$ К до $T < T_C$, где T_C — точка Кюри.

Результаты моделирования

На основании построенной модели явления самообращения были рассчитаны температурные зависимости намагниченности (ТЗН) горной породы при разных напряженностях магнитного поля H . В зависимости от H , а значит, в зависимости от разных соотношений между величинами E_A и E_H получены три типа ТЗН. В слабых магнитных полях ($E_A \gg E_H$, $H_C > H$ при всех рассматриваемых значениях температур, где H_C — коэрцитивная сила) получается кривая ТЗН типа 1, которая характеризуется единственной точкой компенсации (ТК) и наличием самообращения (рис. 3). В полях, больших коэрцитивной силы ансамбля ферромагнитных зерен во всем рассматриваемом температурном диапазоне, получается ТЗН типа 2 с единственной точкой компенсации и отсутствием эффекта самообращения (рис. 3). В этом случае при всех рассматриваемых значениях температур выполняются соотношения $E_A < E_H$, $H_C < H$ (сильные поля). Помимо кривых ТЗН типа 1, 2 существует еще и переходная ТЗН типа 3, которая характеризуется двумя ТК и наличием эффекта самообращения (рис. 4).

Две ТК на кривой ТЗН типа 3 имеют принципиально разную природу: более высокотемпературная ТК связана с изменением знака I_S ферромагнетика типа N , а наличие второй ТК связано с процессами намагничивания ансамбля зерен.

С увеличением H более низкотемпературная ТК кривой ТЗН типа 3 сдвигается влево по температурной оси (рис. 4) до тех пор, пока кривая ТЗН полностью не переходит в положительную полуплоскость и не превращается в ТЗН типа 2, что соответствует экспериментальным данным (рис. 5), где наблюдается соответствующая тенденция (рис. 6). Для ансамбля разных ферромагнитных зерен ТЗН типа 3 имеет единственную ТК, что связано с эффектом усреднения, а ТЗН типа 2 имеет вогнутый вид без ТК (рис. 7), несмотря на то что отдельные

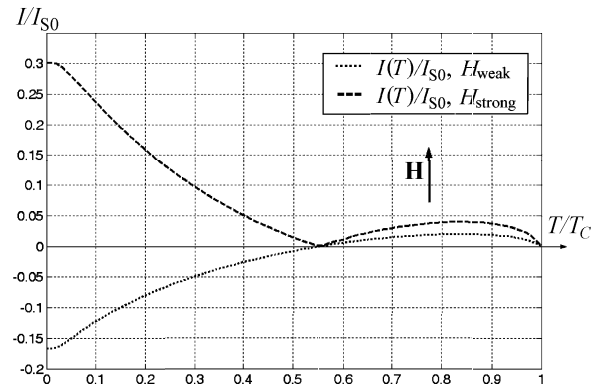


Рис. 3. Температурные зависимости намагниченности ансамбля $N = 50$ одинаковых ферромагнитных зерен в слабом H_{weak} и сильном H_{strong} магнитных полях

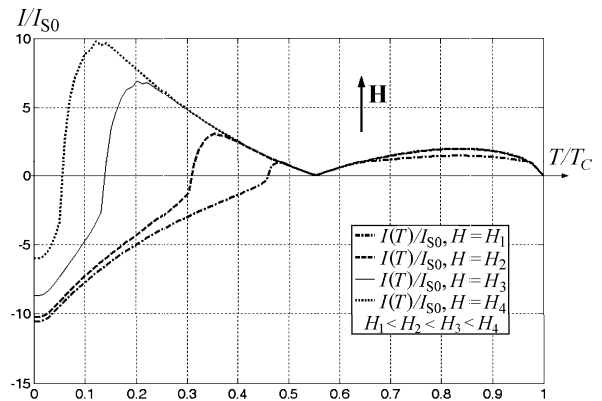


Рис. 4. Температурные зависимости намагниченности ансамбля $N = 50$ одинаковых ферромагнитных зерен в магнитных полях $H_1 < H_2 < H_3 < H_4$

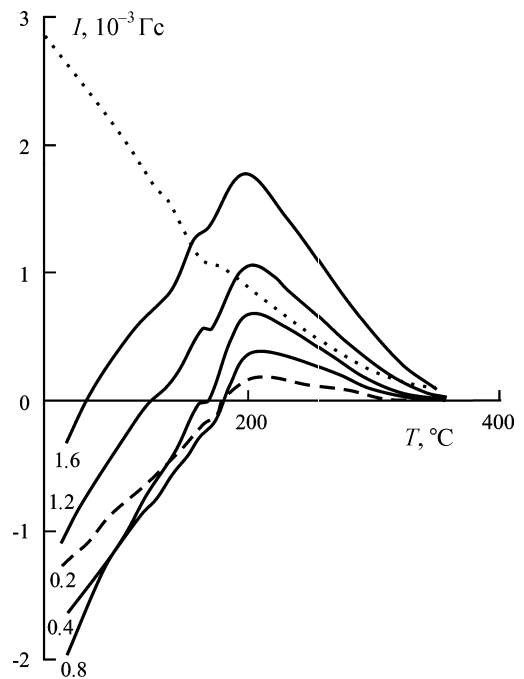


Рис. 5. Температурные зависимости намагниченности образцов горной породы, содержащей природные пикроильмениты, полученные при охлаждении в $H = 0, 2, \dots, 4$ Э [6]

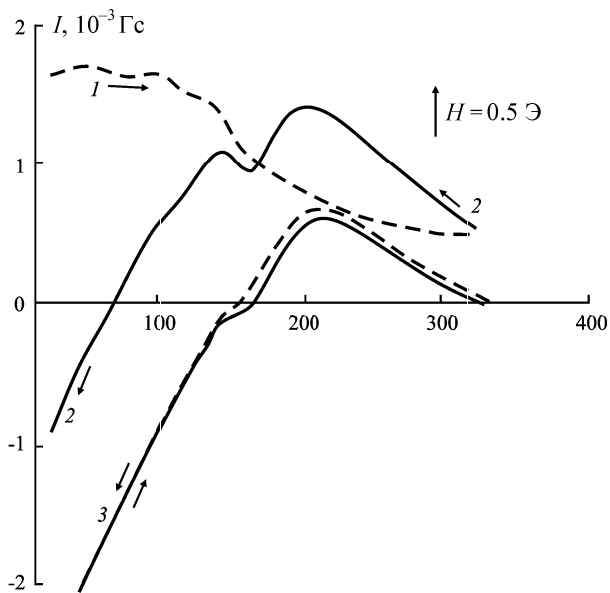


Рис. 6. Самообращение полной и остаточной термонамагниченности при охлаждении от 350 °С [6]

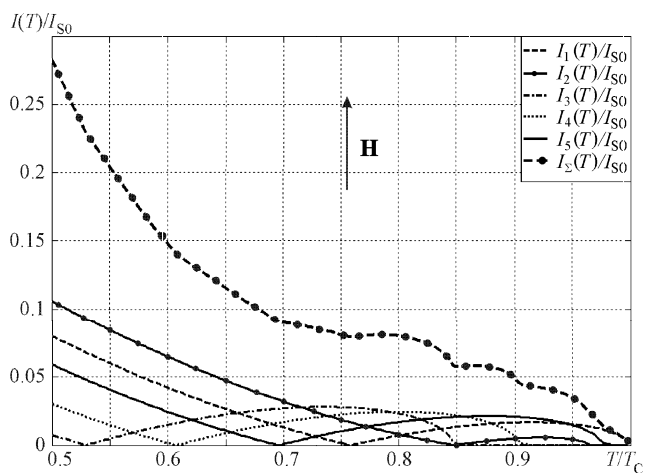


Рис. 7. Температурные зависимости намагниченности ансамбля $N = 5$ однодоменных ферромагнитных зерен с разными константами молекулярного поля α, β в сильном магнитном поле

зерна ансамбля принадлежат типу N . А это значит, что, получив экспериментально на образце горной породы ТЗН, как на рис. 7, имеет смысл искать

на нем эффект самообращения намагниченности, охлаждая его в слабом магнитном поле.

Выводы

1. В статье представлена построенная впервые модель самообращения намагниченности горных пород по механизму N -типа температурной зависимости спонтанной намагниченности Нееля. Эта модель позволяет изучать закономерности самообращения в широком диапазоне магнитных параметров ферромагнитных минералов, отвечающих за магнитные свойства горных пород, без проведения соответствующих экспериментов.

2. В рамках вышеописанной модели получены температурные зависимости намагниченности горных пород, ферромагнитные зерна которых характеризуются как одинаковыми, так и разными константами молекулярного поля α, β при разных величинах напряженности магнитного поля H .

3. Все три типа температурных зависимостей намагниченности горных пород, полученные на основании построенной модели самообращения, наблюдаются в эксперименте на горных породах, т. е. имеет место качественное соответствие результатов моделирования результатам эксперимента.

Литература

1. Merrill R.T. The Magnetic Field of the Earth. 1998.
2. Néel L. // Ann. Geophys. 1951. 7. P. 90.
3. Hoffman K.A. // J. Geophys. Res. 1992. 97. P. 10883.
4. Трухин В.И. и др. // Физика Земли. 1997. № 2. С. 52.
5. Трухин В.И. и др. Магнетизм кимберлитов и траппов. М., 1989.
6. Трухин В.И., Караевский С.Х. Самообращение намагниченности природных пикроильменитов. М., 1996.
7. Трухин В.И. и др. // Физика Земли. 2004. № 6. С. 42.
8. Néel L. // Ann. Phys. 1948. 3. P. 137.
9. Кринчик Г.С. Физика магнитных явлений. М., 1985.

Поступила в редакцию
12.01.05