

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Михайлова Н. А., Фоменко Г. С. Исследование кинематической структуры потока и движения твердых частиц в его придонной области.—Деп. ВИНТИ, № 972—75. Деп. [2] Михайлова Н. А., Фоменко Г. С. Исследования распределения концентрации тяжелых частиц в придонном слое турбулентного потока.—Водные ресурсы, 1975, № 4, с. 145—151. [3] Михайлова Н. А., Фоменко Г. С. Исследование кинематической структуры потока и движения тяжелых частиц в его придонной области.—Вести. Моск. ун-та. Сер. Физ. Астрон., 1975, 16. № 6, с. 670—678. [4] Гришанин К. В. Динамика русловых потоков.—Л.: Гидрометеоздат, 1969, 428 с. [5] Ибад-Заде Ю. А. Движение наносов в открытых руслах.—М.: Стройиздат, 1974, 352 с.

Поступила в редакцию  
11.05.79

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1981, Т. 22, № 5

УДК 538.24; 550.380.8

### УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕОБРАТИМЫХ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД И МИНЕРАЛОВ В ПЕРЕМЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

**В. И. Максимочкин, К. А. Валеев**

*(кафедра физики Земли)*

В настоящее время имеется небольшое число работ, посвященных описанию установок для измерения необратимых магнитных свойств горных пород и минералов [1—5]. Между тем развитие представлений о магнетизме горных пород и палеомагнетизме требует разработки все новых и новых приборов и установок, отвечающих требованиям настоящего времени.

Горные породы по своим магнитным характеристикам можно отнести к слабомагнитным веществам. Начальная магнитная восприимчивость их изменяется в пределах  $10^{-2}$ — $10^{-7}$  ед. СГСМ, остаточная намагниченность —  $10^1$ — $10^{-8}$  Гс и менее. Для измерения таких малых магнитных величин требуются приборы, обладающие высокой чувствительностью.

Для определения остаточной намагниченности горных пород наибольшее распространение получили следующие три метода: индукционный, магнитомодуляционный и магнитометрический. Магниточувствительными элементами, регистрирующими намагниченность образца, являются соответственно катушка [1, 2], феррозондовый датчик [3] и аstaticкий магнитометр [4, 5].

Применением индукционного метода по принципу рок-генератора была достигнута чувствительность по остаточной намагниченности порядка  $10^8$  делений на гаусс [2]. Приборы, основанные на магнитомодуляционном методе измерения, оказались более стабильными в работе [3], однако достигнутая при этом чувствительность оказалась на порядок ниже ( $10^7$  дел./Гс). Приборы, основанные на индукционном и магнитомодуляционном методах, довольно сложны. Это связано с жесткими требованиями, предъявляемыми к их электронной части. Дополнительная трудность заключается в необходимости экранировки магниточувствительных датчиков. Магнитометрический метод в основном лишен этих недостатков. Магнитометры по своей конструкции очень просты, но чувствительность их по магнитному моменту на два порядка ниже и составляет  $10^5$  дел./ед. СГСМ. В настоящее время появились аstaticкие магнитометры с электронной обратной связью,

что позволило на порядок повысить чувствительность и автоматизировать процесс измерения [5].

Для размагничивания образцов горных пород, а также для образования идеальной остаточной намагниченности применяется магнитное поле промышленной частоты (это просто и удобно). Однако вопрос о выборе оптимальной частоты поля для этих целей остается открытым. В частности, размагниченное состояние можно получить, если уменьшение амплитуды переменного поля при размагничивании за

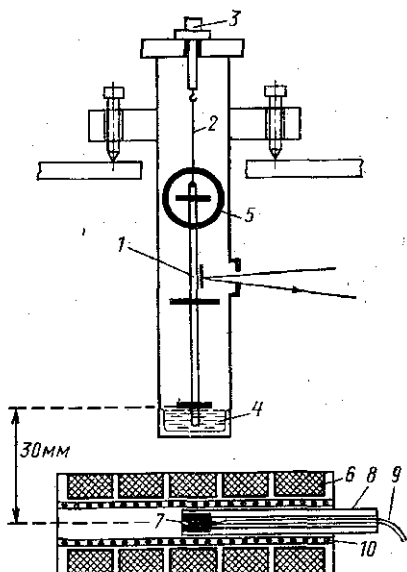


Рис. 1. Схема установки. 1 — трехмагнитная астатическая система, 2 — бронзовая нить, 3 — механический корректор, 4 — масляный демпфер, 5 — кольца обратной связи, 6 — пятисекционная катушка-соленоид, 7 — образец, 8 — держатель, 9 — термopара (медь—константан), 10 — нагревательная печь

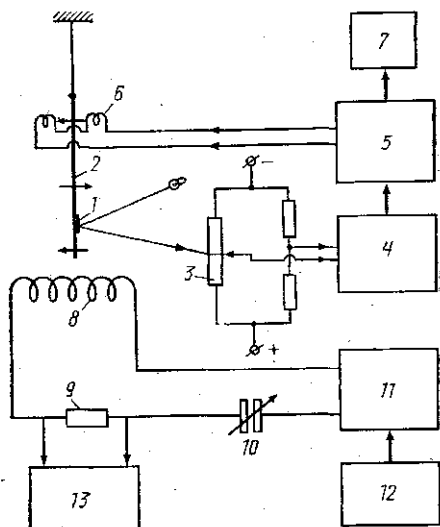


Рис. 2. Электрическая блок-схема установки. 1 — зеркальце, 2 — астатическая трехмагнитная система, 3 — дифференциальное фотосопротивление, 4 — малозумящий усилитель постоянного тока, 5 — делитель напряжения, 6 — катушка обратной связи, 7 — цифровой вольтметр, 8 — высокочастотный соленоид, 9 — безреактивное сопротивление, 10 — высоковольтный магазин емкостей, 11 — усилитель мощности, 12 — генератор звуковой частоты, 13 — вольтметр пиковых значений

один период будет достаточно мало. Время размагничивания можно уменьшить, увеличивая частоту размагничивающего поля. Увеличение же частоты поля может привести к нарушению условия квазинепрерывного следования магнитного момента за меняющимся полем. Таким образом, начиная с определенной частоты, может появиться частотная дисперсия магнитных свойств ферромагнитных материалов [6, 7].

Отсутствие методики и необходимой аппаратуры до сих пор не позволяло исследовать влияние частоты магнитного поля на необратимые магнитные свойства горных пород и минералов.

Для непрерывного измерения необратимых магнитных свойств в переменных полях необходим такой измеритель остаточной намагниченности, который реагировал бы только на постоянное поле, созда-

ваемое остаточной намагниченностью образца. В связи с этим нами была сконструирована и изготовлена установка для исследования размагничивания образцов горных пород переменным магнитным полем с максимальной амплитудой до 600 Э в диапазоне частот 50 Гц—20 кГц. При этом установка позволяла контролировать симметричность переменного магнитного поля. Измерителем остаточной намагниченности служил изготовленный нами магнитометр с электронной обратной связью. В качестве магниточувствительного элемента использовалась изготовленная нами трехмагнитная астатическая система 1 (рис. 1), подвешенная на тонкой бронзовой нити 2. Расстояние между магнитами составляло 7 см, длина нити — 10 см.

Электрическая блок-схема представлена на рис. 2. Принцип работы магнитометра заключается в следующем: свет, отражаясь от зеркала 1, прикрепленного к оси астатической магнитной системы 2, попадает на дифференциальное фотосопротивление 3, включенное в схему моста. В случае неодинаковой освещенности фотосопротивления в диагонали моста появляется сигнал раскомпенсации, который усиливается малошумящим усилителем постоянного тока 4, далее через распределитель 5 сигнал подается в катушки обратной связи 6. Результат отсчитывается по цифровому интегрирующему вольтметру 7, включенному в цепь обратной связи. Катушки обратной связи были выполнены в виде колец Гельмгольца диаметром 5 см со 150 витками провода и помещались около верхнего магнита астатической системы. Наличие электронной обратной связи позволяло непрерывно измерять магнитный момент образца в пределах  $10^{-5}$  ед. СГСМ — 1 ед. СГСМ. При этом образец находился на фиксированном расстоянии 3 см от нижнего магнита.

Для создания магнитного поля с частотой порядка десятков кГц и достаточно большой амплитуды был рассчитан и изготовлен соленоид специальной конструкции с высокой добротностью. Расчет соленоида производился подобно расчету катушек индуктивности в радиотехнике [8]. Соленоид 6 (см. рис. 1) длиной 160 мм и внутренним диаметром 20 мм состоял из пяти секций. Из условия минимума активного сопротивления при заданной частоте ( $\nu=40$  кГц) и при заданной геометрии катушки соленоида вычислялся диаметр намоточного провода, который получился равным 0,25 мм. Соленоид имел следующие параметры: постоянная соленоида по постоянному току  $K=460$  Э/А, добротность  $Q=96$ .

Сигнал синусоидальной формы от звукового генератора 12 (см. рис. 2) усиливался усилителем мощности 11 ( $P=600$  Вт) и подавался на колебательный контур, состоящий из магазина емкостей 10, эталонного активного сопротивления 9 ( $R_{от}=1,5$  Ом) и индуктивности соленоида 8. Путем изменения емкости контур настраивался в резонанс с частотой вынуждающих колебаний, что позволяло пропустить по соленоиду достаточно большой ток и, следовательно, получить магнитное поле достаточно большой напряженности в диапазоне частот 50 Гц—20 кГц. В частности, на частоте 20 кГц удалось получить поле  $h_{ампл}=600$  Э. Дальнейшее увеличение поля стало невозможным из-за пробоя между витками соленоида при возникновении резонанса.

Образец 7 фиксировался держателем 8 в середине соленоида 6 (см. рис. 1). Поскольку соленоид располагался в непосредственной близости от магнитометра, то магниточувствительная система реагировала на появление постоянной составляющей поля, т. е. на появление четных гармоник в переменном поле. Таким образом, астатическая

магнитометрическая система может служить также индикатором подмагничивания образца переменным полем.

На изготовленной установке проводились исследования влияния частоты переменного магнитного поля на необратимые магнитные характеристики горных пород. Образцы пород имели кубическую форму с размером ребра 1 см. Объектом исследования служили горные породы с магнетитовой ферромагнитной фракцией с размером зерна 5—10 мкм, а также базальты, магнитная фракция которых представляла собой магнетиты и титаномангнетиты. Относительная погрешность измерения остаточной намагниченности не превышала 2%.

Исследовалось влияние частоты магнитного поля на образование парциальных идеальных намагниченностей ( $I_{ri}$ ), а также на их стабильность по отношению к магнитному полю различных частот.  $I_{ri}$  создавалась действием постоянного поля  $H$  напряженностью 6 Э и изменением переменного магнитного поля  $h$  от некоторого максимального значения до нуля при частотах магнитного поля 50 Гц и 19 кГц.

Результаты представлены на рис. 3 и 4. Обнаружена определенная зависимость величин  $I_{ri}$  от частоты магнитного поля. Кривые  $I_{ri} = f(h, H=6 \text{ Э})$ , полученные при частоте 19 кГц (кривые 1 на рис. 3 и 4), идут выше соответствующих кривых при частоте 50 Гц (кривые 2).

Парциальная идеальная остаточная намагниченность, определенная при более высоких частотах, оказалась более стабильной, чем  $I_{ri}$ ,

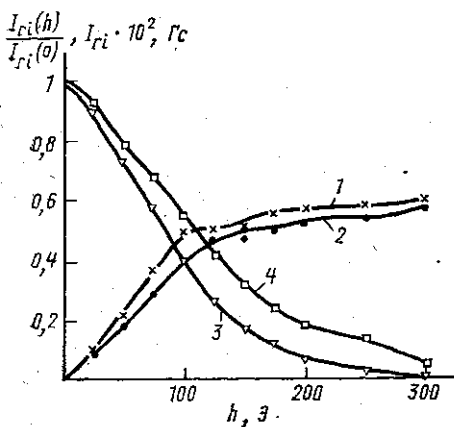


Рис. 3. Зависимость парциальной  $I_{ri}$  от напряженности переменного магнитного поля ( $h$ ) различной частоты для образца с магнетитовой ферромагнитной фракцией с размером зерна 5—10 мкм. 1— $H=6 \text{ Э}$ ,  $\nu=19 \text{ кГц}$ ; 2— $H=6 \text{ Э}$ ,  $\nu=50 \text{ Гц}$ ; 3— $H=0$ ; 19/0,05; 4— $H=0$ ; 0,05/19 (здесь в числителе дроби стоит частота поля размагничивания, а в знаменателе — частота поля образования  $I_{ri}$  в кГц)

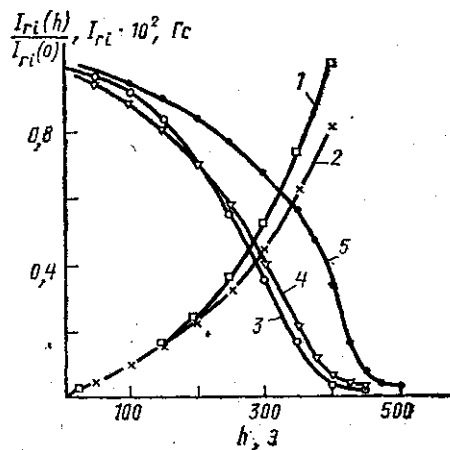


Рис. 4. Зависимость парциальных  $I_{ri}$  от напряженности магнитного поля различной частоты для образца базальта. 1— $H=6 \text{ Э}$ ,  $\nu=19 \text{ кГц}$ ; 2— $H=6 \text{ Э}$ ,  $\nu=50 \text{ Гц}$ ; 3— $H=0$ ; 19/0,05; 4— $H=0$ ; 0,05/19 (здесь в числителе дроби стоит частота поля размагничивания, а в знаменателе — частота поля образования  $I_{ri}$  в кГц)

полученная при действии магнитного поля той же напряженности, но частотой 50 Гц (кривые 3, 4, 5 на рис. 3 и 4).

Наблюдаемые нами эффекты, по-видимому, связаны с релаксационными процессами, спектр собственных частот которых захватыва-

вается действующим частотным диапазоном. На связь подобных эффектов с релаксацией, обусловленной диффузионными процессами, впервые было указано в работе [9].

Известно, что времена релаксации, обусловленной диффузией в твердых телах, сильно зависят от температуры [6, 10], поэтому для выяснения механизмов, ответственных за полученные эффекты, была измерена температурная зависимость стабильности парциальных  $I_{ri}$ , образованных при частотах 50 Гц и 19 кГц. Нагрев производился с помощью печи с бифилярной намоткой, охлаждался образец парамагнитного азота, температура измерялась медь-константановой термопарой.

Определялось переменное поле  $h_{90}$ , необходимое для разрушения на 90% парциальной  $I_{ri}$ , созданной в поле  $H = 6$  Э и  $h_{\max} = 300$  Э на образце с магнетитовой ферримагнитной фракцией с размером зерна 5—10 мкм, при температурах  $-40^\circ$ ,  $+25^\circ$ ,  $+75^\circ\text{C}$ . Приведенные данные (рис. 5) показывают, что с увеличением температуры  $h_{90}$  уменьшается, при этом также уменьшается различие в  $h_{90}$  при размагничивании на высоких и низких частотах. Это, по-видимому, связано с тем, что при повышении температуры спектр собственных частот релаксации сдвигается в область высоких частот, что свидетельствует о диффузионном механизме релаксации.

**Закключение.** Результаты проведенных частотных исследований необратимых магнитных свойств горных пород на специальной уста-

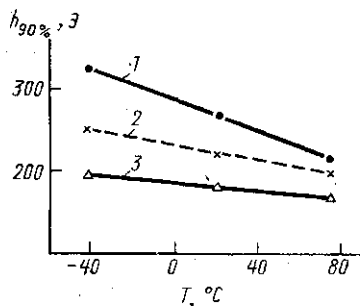


Рис. 5. Зависимость  $h_{90}$  от температуры при различных способах размагничивания образца с магнетитовой ферримагнитной фракцией с размером зерна 5—10 мкм. 1—0,05/19, 2—0,05/0,05, 3—19/0,05

новке, сконструированной и изготовленной авторами, дают возможность сделать следующие основные выводы:

1. Величина и стабильность парциальных  $I_{ri}$  зависят от частоты магнитного поля в пределах звукового диапазона.

2. На частоте магнитного поля  $\nu = 19$  кГц образуется парциальная идеальная остаточная намагниченность, большая по величине, чем на частоте  $\nu = 50$  Гц, при одинаковой напряженности переменного магнитного поля, причем стабильность первой  $I_{ri}$  выше, чем второй.

3. Температурные измерения подтверждают связь частотных эффектов с диффузионными процессами в магнитной фракции.

Авторы благодарны проф. В. И. Трухину за ценные замечания и обсуждение данной работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Stacey F. D. Spinner magnetometer for thermal demagnetisation experiments on rocks.— J. Sci. Instr., 1959, 36, N 8, p. 355—359. [2] Дианов-Клоков В. И. Измеритель малой остаточной намагниченности горных пород.— Изв. АН СССР, сер. геофиз., 1960, № 1. [3] Бураков К. С. Термомагнитометр.— Изв. АН СССР, сер. Физ. Земли, 1977, № 5, с. 92—96. [4] Neuman J. Magnetometr mit stromungs freier Magnetisirungs spule. Авт. свидетельство № 945336. ФРГ, 1956. [5] Petherbridge J. An astatic magnetometer with electronic feed back for the measurement of re-

manence of heated rock samples.— J. of Physics. E. Sci. Instr. 1975, 5, N 6, p. 579—581. [6] Крупичка С. Физика ферритов и родственных им магнитных окислов.— М.: Мир, 1976, т. 2, 501 с. [7] Ершов Р. Е., Волгина З. М. Физические и физико-химические свойства ферритов.— М.: Мир, 1975, с. 91—93. [8] Волгов В. А. Детали и узлы радиоэлектронной аппаратуры. М.: Энергия, 1977, 654 с. [9] Максимочкин В. И., Трухин В. И. Исследование зависимости остаточной намагниченности природных магнетитов от частоты магнитного поля.— Вестн. Моск. ун-та. Сер. Физ. Астрон., 1981, 22, № 1, с. 88—90. [10] Трухин В. И. Введение в магнетизм горных пород.— М.: Изд-во Моск. ун-та, 1973, 275 с.

Поступила в редакцию  
01.08.79

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1981, Т. 22, № 5

УДК 538.662

### МАГНИТНАЯ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ ТРОЙНЫХ СПЛАВОВ Cr—Co—V и Cr—Fe—V НА ОСНОВЕ ХРОМА

Е. И. Кондорский, Т. И. Костина, В. П. Медведчиков

(кафедра магнетизма)

**Введение.** Как известно, небольшие добавки переходных металлов заметно изменяют температуру Нееля ( $T_N$ ), средний магнитный момент ( $M$ ), волновой вектор волны спиновой плотности ( $Q$ ) и температуру «поворота» спинов ( $T_{sf}$ ) в антиферромагнитном хrome. В теории Ломера — Феддерса — Мартина [1, 2] это объясняется особенностями поверхности Ферми хрома и его сплавов, электронная и дырочная части которой зависят от концентрации  $C$  электронов проводимости. Как правило, элементы с числом  $3d+4s$  электронов на атом ( $e/a$ ), большим 6, повышают  $T_N$  и увеличивают  $M$  и  $Q$ , а элементы с  $e/a < 6$  уменьшают  $T_N$ ,  $M$  и  $Q$ . Исключением являются Fe, Co и Ni. В таблице Менделеева эти элементы стоят справа от Cr и для них  $e/a > 6$ , тем не менее при увеличении концентрации примеси в сплавах Cr—Ni значения  $M$ ,  $T_N$  и  $Q$  уменьшаются,  $T_N$  в сплавах Cr—Fe уменьшается,  $Q$  увеличивается, а  $M$  остается постоянным вплоть до  $C_0 \approx 10$  ат. % Fe. В сплавах Cr—Co величина  $Q$  увеличивается,  $M$  не меняется, а  $T_N$  зависит от концентрации Co сложным образом: при  $C_0 < 1,5$  ат. % Co она понижается, между 1,5 и 2,5 ат. % растет, а при дальнейшем увеличении концентрации Co снова понижается.

Согласно нейтронографическим исследованиям [3, 4] сплавы Cr—Fe (до 1,5 ат. % Fe) и Cr—Co (до 1 ат. % Co) имеют такую же магнитную структуру, как и чистый Cr, т. е. для  $T < T_N$  в них реализуется состояние с волной спиновой плотности (ВСП), которая поперечно поляризована при  $T_{sf} < T < T_N$  ( $AF_1$ -фаза) и продольно поляризована при  $T < T_{sf}$  ( $AF_2$ -фаза). Для концентрации Fe от 2 ат. % до 4 ат. % в сплавах Cr—Fe при низких температурах появляется антиферромагнитная структура ( $AF_0$ -фаза), когда вектор  $Q$  соизмерим с вектором обратной решетки, причем переход  $AF_0 \rightarrow AF_1$  является переходом первого рода. При дальнейшем увеличении концентрации Fe в сплавах Cr—Fe  $AF_0$ -фаза наблюдается вплоть до  $T_N$ . По данным [4] в сплавах Cr—Co для концентрации Co выше 2 ат. % при  $T < T_N$  существует только  $AF_0$ -фаза.

Измерение магнитной восприимчивости ( $\chi$ ) сплавов Cr—Fe [5, 6] и Cr—Co [7] показали, что атомы Fe и Co имеют в матрице Cr локальный магнитный момент  $\sim 2\mu_B$ . Величина локального магнитного момента в этих работах определялась из анализа температурной