



РЕКОНСТРУКЦИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ФАРАДЕЯ ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ МАГНИТОМЕТРИИ

М. Н. Никитенко¹, Н. Ф. Кротевич¹, Ю. А. Копытенко²

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия; ²СПбФ Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, Санкт-Петербург, Россия

Для современной геофизической магнитометрии, применяемой для изучения магнитных свойств горных пород, необходимы точные, технологичные, помехозащищенные и, особенно, метрологически обеспеченные измерительные приборы. В 1980-е гг. на основе глубокой реконструкции классического метода Фарадея был создан относительно простой высокочувствительный прибор – измеритель магнитной восприимчивости. Его метрологические и технологические показатели многократно превысили технический уровень всех аналогов фарадеевского типа. По результатам испытаний и мониторинга прибора во многих геофизических организациях, по данным численного моделирования и детального анализа технических характеристик показано, что созданный опытный образец измерителя полностью соответствует современным требованиям геофизической магнитометрии, а по некоторым параметрам вообще не имеет аналогов в рассматриваемой области.

Ключевые слова: горные породы, геофизическая магнитометрия, метод Фарадея, измеритель магнитной восприимчивости, магнитный момент, намагниченность, магнитная вязкость.

RECONSTRUCTION AND APPLICATION OF THE FARADAY METHOD FOR MODERNIZATION OF GEOPHYSICAL MAGNETOMETRY

M. N. Nikitenko¹, N. F. Krotevich¹, Yu. A. Kopytenko²

¹A.A.Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia; ²N.V.Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Saint Petersburg, Russia

For modern geophysical magnetometry used to study the magnetic properties of rocks, we need accurate, technological, noise-proof, and, especially, metrologically secured measuring instruments. In the 1980s, on the basis of a deep reconstruction of the classical Faraday method, a relatively simple highly sensitive device was created, i. e. the magnetic susceptibility meter. Its metrological and technological parameters have exceeded manifold the technical level of all the Faraday-type analogs. The article shows that according to the results of testing and monitoring the instrument in many geophysical organizations, according to numerical simulation and detailed analysis of its technical characteristics this meter prototype model fully complies with the modern requirements of geophysical magnetometry, and for some of the parameters mentioned above has no analogues in the sphere of measurements under consideration.

Keywords: rocks, geophysical magnetometry, Faraday method, magnetic susceptibility meter, magnetic moment, magnetism, magnetic viscosity.

DOI 10.20403/2078-0575-2019-1-25-34

В различных геофизических методах (магниторазведке, магнитотеллурике, палеомагнетизме, магнитотектонике) используется точная магнитометрия.

Объект нашего исследования – та часть геофизической магнитометрии, которая изучает магнитные свойства горных пород и других веществ. Важнейшими для геофизики величинами здесь являются: магнитная восприимчивость k , магнитный момент M , остаточная намагниченность J и магнитная вязкость ν образцов горных пород. Известно, что к геофизической магнитометрии предъявляются весьма жесткие требования в части как метрологии (чувствительность, точность и др.), так и технологии (малые габариты, простота конструкции приборов и их обслуживания, стабильность работы в различных географических и климатических условиях). Для существующих средств измерений магнитных свойств веществ, построенных на различных физических принципах, указанные требования проблемные, поскольку собственные возможности для усо-

вершенствования приборов практически исчерпаны. Но существует редко применяемый в геофизике метод Фарадея (МФ), который содержит ряд неиспользованных резервов, позволяющих радикально и малозатратно провести модернизацию самого метода, а затем использовать его для повышения эффективности геофизической магнитометрии.

Путем существенной реконструкции МФ в 1980-е гг. был разработан прибор – измеритель магнитной восприимчивости (ИМВ) любых веществ (твердых, жидких, газообразных), которые в быту считаются немагнитными, например, вода, дерево, многие горные породы и т. д. Потребительские свойства данного прибора, в том числе основные технические характеристики, без глубокого их анализа были приведены в работе [2]. В предлагаемой статье выполнен аналитический разбор метролого-технологических качеств опытного образца ИМВ в более доказательном виде. В результате выявлены новые перспективы усовершенствования МФ для целенаправленного использования его в геофизике.

Получены новые данные мониторинговых исследований за истекший период, которые существенно дополняют результаты ранее проведенных испытаний опытного образца ИМВ, включая обязательные в СССР госиспытания по программе Госстандарта. Многие технические новшества реконструкционных исследований защищены авторскими свидетельствами на изобретения¹.

Метод Фарадея и возможности его усовершенствования

Это, на первый взгляд, простой способ измерения силы взаимодействия между магнитом и образцом вещества, которое в обиходе принято считать немагнитным. Однако данная сила чрезвычайно мала: нижний предел ее составляет сотые и тысячные доли дин. Поэтому в измерительной установке М. Фарадей использовал мощный электромагнит, который сам и изобрел; вблизи от его полюса он подвешивал образец вещества, а другой конец нити привязывал к плечу очень точных рычажных весов. Подробное описание этой установки дано в [4]. Установка оказалась громоздкой и сложной, однако издержки метода многократно окупались гениальным открытием Фарадея в 1846 г. – явления диа- и парамагнетизма.

Дальнейшее развитие МФ долгие годы проходило под влиянием популярности идей Фарадея, где основное внимание уделялось усилению мощности электромагнита и поиску оптимальных форм его полюсных наконечников. Но эти исследования не могли решить главной проблемы – громоздкости и сложности измерительной аппаратуры.

Из других исследований по созданию простых магнитометров для массовых измерений, весьма важных в геофизике, можно отметить работы [4, 5], в которых высказывалась прогрессивная идея о замене электромагнита постоянным подвижным магнитом. Однако реализация этой идеи оказалась несовершенной и мало пригодной для геофизической магнитометрии.

По МФ измеряется сила, действующая на образец в неоднородном магнитном поле:

$$F = \kappa V H \frac{dH}{dR}, \quad (1)$$

где κ – магнитная восприимчивость образца, ед. СГСМ; V – объем образца, см³; H – магнитное поле,

дин; $\frac{dH}{dR}$ – градиент этого поля, дин/см, создаваемый электромагнитом или магнитом в объеме образца.

¹ Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки, полученные Н. Ф. Кротевичем, В. Г. Сергеевым: авторские свидетельства № 723468 (1978, бюл. № 110); № 746354 (1978, бюл. № 250); № 798654 (1979, бюл. № 3); № 1182555 (1982, бюл. № 11).

Образует силовую связку, в которой электромагнит МФ заменен обычным стержневым магнитом длиной $2l$ (рис. 1) и поменяем функции магнита и образца: магнит сделаем подвижным вдоль оси OO' в пределах $\pm S$ относительно нулевого положения, а образец – неподвижным. Эти две операции составляют основу реконструкции МФ. Для повышения силового эффекта выберем магнит, изготовленный из сплава редкоземельных элементов, например, самария и кобальта. Форма магнитов обычно прямоугольная. Для анализа выбранной связки образец будет иметь также кубическую форму.

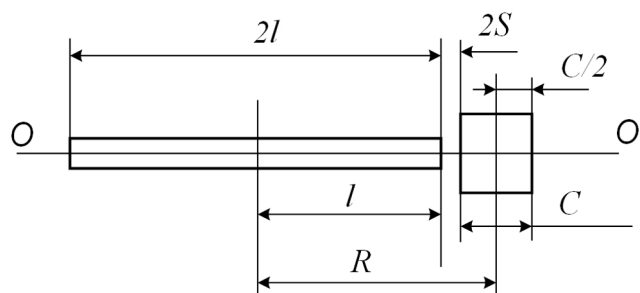


Рис. 1. Схема для определения силового взаимодействия между постоянным магнитом и неферромагнитным образцом

Результатом следующего этапа реконструирования МФ может служить упрощенная схема устройства (рис. 2), которое по принципу действия близко к реальному прибору для измерения магнитной восприимчивости.

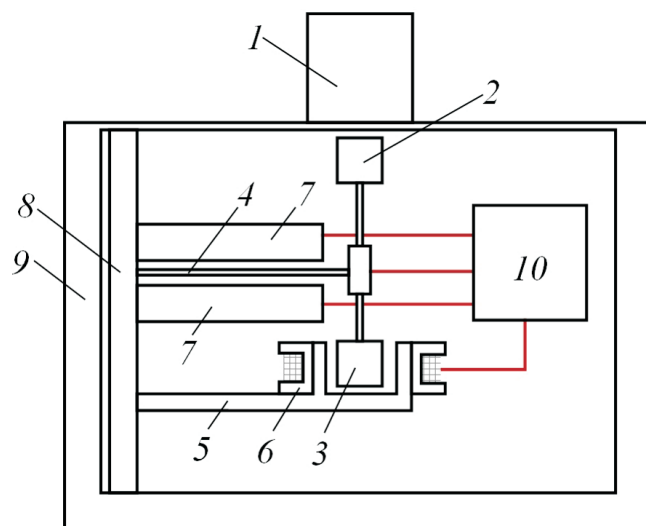


Рис. 2. Принцип построения измерителя магнитной восприимчивости как результат реконструкции МФ

Здесь связку, изображенную на рис. 1, представляет конструкция, состоящая из двух одинаковых жестко связанных магнитов 2 и 3, подвешенная консольно на ленточной пружине 4 и взаимодействующая магнитом 2 с измеряемым образцом 1. Нижний магнит 3, закрепленный антипараллельно верхнему магниту, взаимодействует с медным демпфером 5. Система магнитов может перемещаться вверх или вниз после установки образца 1

на горизонтальную стенку корпуса 9, а также в обратном направлении после снятия образца с предметного столика. Неподвижные металлические пластины 7 симметрично охватывают подвижную ленточную пружину 4, вместе с которой образуют дифференциальный конденсатор переменной электрической емкости, подключенный проводами к электронной плате 10, преобразующей изменение емкости конденсатора в электрическое напряжение. Выходной сигнал электронной платы регистрируется аналоговым или цифровым вольтметром. Аналоговый сигнал подается также на катушку 6 обратной отрицательной связи (ООС) по магнитному полю, взаимодействующему с магнитом 3. Ленточная пружина 4 и металлические пластины 7 жестко закреплены в изолирующей прокладке 8. Все механические и электронные элементы размещены в герметичном дюралюминиевом корпусе 9. Регистрирующий прибор находится вне корпуса.

В результате реконструкции метода Фарадея мы получили предельно возможную простоту измерительного устройства, что является следствием замены дорогостоящих и массивных звеньев в приборах фарадеевского типа (электромагнита и весового устройства) миниатюрным магнитом весом около 1 г и столь же миниатюрным электро-механическим преобразователем, как это следует из рис. 2.

В итоге в рассмотренном устройстве вместо одноступенчатого преобразования Фарадея $K = d\kappa/dF$ применено четырехступенчатое преобразование:

$$K = \frac{d\kappa}{dF} \frac{dF}{dS} \frac{dS}{dC} \frac{dC}{dU} = \frac{d\kappa}{dU}, \quad (2)$$

где F – фарадеевская сила, дин; S – смещение магнита, см; C – емкость конденсатора, Ф; U – выходное напряжение электронной платы, В.

Такое преобразование позволяет преодолеть многочисленные трудности измерения сверхмалых Фарадеевских сил методом взвешивания.

Выражение (2) может иметь две равнозначные формы:

$$K = d\kappa/dU \text{ и } 1/K = dU/d\kappa. \quad (3)$$

Величина K (ед. СГСМ/мкВ) определяет цену деления прибора, $1/K$ характеризует чувствительность прибора.

Анализ и численное моделирование геометрических параметров силовой связи «магнит – образец»

Исходные выражения для численного моделирования

Произведение величины напряженности поля H на его градиент dH/dR в формуле (1) перепишем в другой форме, поскольку непосредственное измерение градиента поля – трудная задача.

Магнитное поле стержневого магнита определяется следующим выражением [3]:

$$H = 2M \left(\frac{1}{R^3} + 2 \frac{l^2}{R^5} + 3 \frac{l^4}{R^7} + 4 \frac{l^6}{R^9} + 5 \frac{l^8}{R^{11}} + 6 \frac{l^{10}}{R^{13}} + \right. \\ \left. + 7 \frac{l^{12}}{R^{15}} + 8 \frac{l^{14}}{R^{17}} + 9 \frac{l^{16}}{R^{19}} + 10 \frac{l^{18}}{R^{21}} + 11 \frac{l^{20}}{R^{23}} + \dots \right), \quad (4)$$

где M – магнитный момент магнита Э·см³, остальные обозначения см. на рис. 1.

Дифференцируя (4) по R , получим

$$\frac{dH}{dR} = \left(-2M \frac{3}{R^4} + 10 \frac{l^2}{R^6} + 21 \frac{l^4}{R^8} + 36 \frac{l^6}{R^{10}} + \right. \\ \left. + 55 \frac{l^8}{R^{12}} + 78 \frac{l^{10}}{R^{14}} + 105 \frac{l^{12}}{R^{16}} + 136 \frac{l^{14}}{R^{18}} + \right. \\ \left. + 171 \frac{l^{16}}{R^{20}} + 210 \frac{l^{18}}{R^{22}} + 253 \frac{l^{20}}{R^{24}} + \dots \right) \quad (5)$$

Перемножая (4) и (5), получим

$$H \frac{dH}{dR} = -4M^2 \frac{L}{R^7},$$

где $L = 3 + 16a^2 + 50a^4 + 120a^6 + 245a^8 + 448a^{10} + 756a^{12} + 1200a^{14} + 1815a^{16} + 2640a^{18} + 3718a^{20} + \dots$, $a = l/R$.

Величина $\frac{L}{R^7}$ представляет собой геометрический фактор формулы (1), следовательно, фарадеевская сила будет равна по абсолютному значению

$$|F| = 4M^2 \kappa V \frac{L}{R^7}. \quad (6)$$

Ряд, определяющий геометрический фактор, является медленно сходящимся. Скорость сходимости ряда зависит от величины $a = l/R < 1$. Сходимость существенно улучшается при $a < 0,7$.

Влияние длины магнита на силу его взаимодействия с образцом

Для численного моделирования этой задачи используем формулу (6) и схему, показанную на рис. 1 (табл. 1).

К исходным данным табл. 1 добавим следующие: образец кубической формы имеет размеры сторон $s = 2$ см и магнитную восприимчивость $\kappa = 10^{-5}$ ед. СГСМ; $h = 0,1$ см.

Из табл. 1 следует, что короткие магниты ($2l = 0,25$ см и $2l = 0,5$ см) по удельному значению фарадеевской силы превосходят длинный магнит ($2l = 8$ см) почти на порядок. Это обусловлено тем, что по геометрическому фактору L/R^7 магниты отличаются более, чем в 200 раз. Кроме того, короткие магниты, имеющие малую массу, дают большие технологические преимущества магнитоизмерительным приборам – быстродействие, весогабаритность, прочность, срок службы и др.

Таблица 1

Значения удельной силы $|F|/V$ и геометрического фактора L/R^7 в зависимости от длины магнита $2l$, магнитного момента M , объема магнита V_0 и параметра R

$2l$, см	8	4	2	1	0,5	0,25
$R = l + h + c/2$	5,1	3,1	2,1	1,6	1,35	1,225
M , Э·см ³	800	400	200	100	50	25
V_0 , см ³	2	1	0,5	0,25	0,125	0,0625
$ F /V_0$, дин/см ³	0,0358	0,0924	0,166	0,247	0,283	0,245
L/R^7 , 1/см ⁷	0,0035	0,018	0,0647	0,193	0,442	0,767

Влияние формы магнита на силу его взаимодействия с образцом

Численный эксперимент в данном случае состоит в следующем. Можно изготовить магнит другой формы, совпадающий по объему и магнитному моменту с рассмотренным выше стержневым магнитом, для которого $V = 2$ см³ и $M = 800$ Э·см³. Форму нового магнита выберем в виде пластинки размером $V = 2 \times 2 \times 0,5$ см³, намагниченной перпендикулярно плоскости размером 2×2 см². Возможность изменения формы для магнитов, изготовленных на основе редкоземельных сплавов, обусловлена тем, что коэффициент их размагничивания слабо зависит от их формы.

Так как объемы и магнитные моменты стержневого и пластинчатого магнитов одинаковы, силы взаимодействия их с образцом будут различаться лишь множителем L/R^7 . Следовательно, отношение сил их взаимодействия согласно табл. 1 будет равно $0,442/0,0035 = 126$, т. е. эффект при использовании пластинчатого магнита получается довольно значительным.

Геометрические параметры активной зоны измеряемого образца

В технике измерений магнитных свойств веществ всегда существовала проблема выбора «правильного» образца. В МФ эта проблема не решена до сих пор. Данного недостатка не лишена и геофизическая магнитометрия. В нашем случае требования к измеряемому образцу не самые сложные: он может иметь произвольную форму при наличии хотя бы одной плоской грани, прилегающей к предметному столику, вес его должен быть от 50 до 2000 г. Задача, которую мы ставим, заключается в том, чтобы найти «правильную» форму части образца. Назовем ее активной зоной (АЗ), т. е. той части объема образца, которая тесно примыкает к предметному столику и по силовому взаимодействию с магнитом практически равная силе взаимодействия с магнитом всего образца. В этом состоит большое технологическое преимущество измерений, так как объем образца, превосходящий объем АЗ, на результаты измерений не влияет.

Методика определения АЗ содержит две операции: численное и инструментальное моделирование. Схема проведения эксперимента показана на рис. 3.

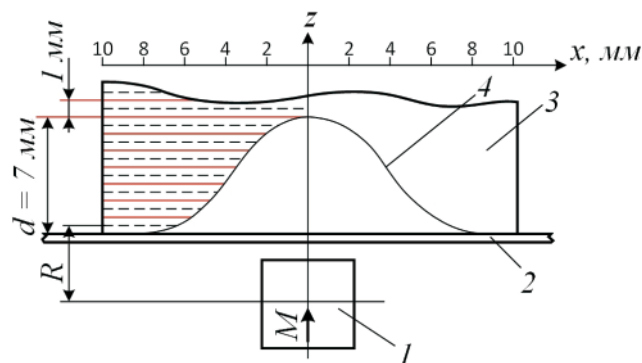


Рис. 3. Схема установки для численного моделирования геометрии активной зоны измеряемого образца

Измеряемый образец 3, изображенный в усеченном виде, установлен на неподвижный предметный столик 2. Образец вместе с магнитом 1, условно зафиксированным в «нулевом» положении, образуют статическую систему, для которой с заданной точностью, например 99,9 %, следует определить геометрические параметры АЗ. Для этого представим, что образец состоит из ряда слоев, каждый толщиной 1 мм. Параметр R – расстояние от центра магнита до центра каждого слоя. По формуле (6) рассчитаем силу взаимодействия со всеми слоями и определим вклад каждого из них в суммарную силу.

Исходными данными для эксперимента являются размер магнита $0,5 \times 0,5 \times 0,5$ см³, его магнитный момент 50 Э·см³, размер образца $2 \times 2 \times 2$ см³, его магнитная восприимчивость 10^{-5} ед. СГСМ. Расчетные данные этой части эксперимента приведены в табл. 2. По ним определяется величина d , характеризующая размер АЗ с погрешностью 0,046 %.

Можно сделать следующие выводы. Наибольший вклад в силу $|F|$ вносит нижний слой образца (86 % от суммарной силы). Максимальную силу 44,2 дин обеспечивает магнит, объем и вес которого равны 0,125 см³ и 1 г соответственно. Эта сила соизмерима со значениями, которые дают мощные электромагниты в установках фарадеевского типа.

Данные табл. 2 позволяют определить лишь один параметр АЗ d по оси z прямоугольной системы координат. Для объемного распределения АЗ необходимы данные изменения величины K по оси x . Эту операцию проводим с помощью действующего образца ИМВ профилированием по оси x , в результате чего имеем функцию зависимости K от

Таблица 2

Результаты для определения параметра d АЗ измеряемого образца

R , см	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95	1,05
L/R^7 , 1/см ⁷	5590	703	142	41,8	14,9	6,29	2,91
$ F $, дин	44,2	5,62	1,13	0,334	0,118	0,05	0,023
$ F $, %	86	10,8	2,17	0,64	0,23	0,096	0,046

Таблица 3

Относительная зависимость K по оси z от x

$\pm x$, мм	0	1	2	3	4	5	6	7	8
K_z , мм	7	6,85	6,35	5,6	3,4	1,8	0,8	0,25	0

x на участке предметного столика $\pm x$ относительно центра прибора. Эта зависимость, нормированная на значение d , приведена в табл. 3.

По результатам табл. 3 строится график 4 (см. рис. 3) в плоскости xz , путем вращения которого вокруг оси z получаем объемное изображение АЗ образца.

Полученную сложную форму АЗ целесообразно заменить более простой, в которую она может быть вписана с некоторым запасом: цилиндр диаметром 16 мм и высотой 10 мм. Следовательно, с целью корректных измерений все образцы для прибора ИМВ должны иметь размеры, в которые бы вписывался указанный цилиндр.

Преобразование магнитной восприимчивости и других магнитных величин в электрический сигнал

Схема конкретного устройства преобразования показана на рис. 4 в плоскости xz . Стрелкой 10 обозначен след упругой растяжки, направленной перпендикулярно плоскости xz . На растяжке подвешена жесткая конструкция, состоящая из пластины 4 длиной 8 см, шириной 2 см, толщиной 1 мм с двумя магнитами на ее концах: 3 – рабочим и 7 – демпфирующим. В целом данная конструкция представляет собой физический крутильный маятник (КМ), который выполняет несколько функций: совместно с неподвижными электродами 5 представляет дифференциальный конденсатор переменной емкости, является преобразователем силы F в смещение S и выполняет функцию демпфирования совместно с медным демпфером 6. Другие элементы: 1 – измеряемый образец, 2 – часть корпуса, на которой устанавливается образец, 9 – провода, соединяющие дифференциальный конденсатор с электронным преобразователем 8 (его схема подробно рассмотрена в [2]). Недостающая на данном рисунке цепь обратной отрицательной связи (ООС) представлена на рис. 2.

Рассмотрим динамику вращательного движения КМ. Крутильная жесткость растяжки, на которой подвешен КМ, определяется следующей формулой [4]:

$$C = \frac{\pi G d^4}{32 l}, \quad (7)$$

где G – модуль сдвига материала растяжки, изготовленной из бериллиевой бронзы ($G = 3,6 \cdot 10^{11}$ дин/см²); $l = 3$ см – длина растяжки.

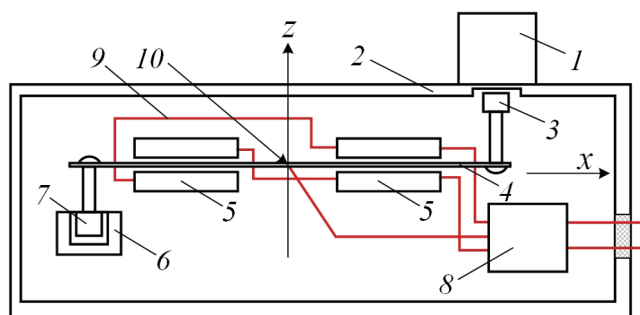


Рис. 4. Функциональная схема ИМВ – преобразователя величины магнитной восприимчивости в электрический сигнал

Определим период колебаний КМ [4] и его зависимость от величины d – усредненного диаметра растяжки по формуле

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{C}}, \quad (8)$$

где I – момент инерции КМ, расчетная величина которого для реальной конструкции равна 10,7 г·см². Следовательно,

$$T = N/d^2 \text{ или } d = N^{1/2}/T^{1/2},$$

где $T = 1,89 \cdot 10^{-4}$ с·см², $N^{1/2} = 1,38 \cdot 10^{-2}$ с^{1/2} см.

Выбирая $T = 1$ с, получим удобное для практики быстродействие прибора 0,5 с и диаметр растяжки $d = 0,0138$ см = 138 мкм.

Момент кручения КМ можно определить двумя способами:

$$M_{кр} = C\phi \text{ или } M_{кр} = FL,$$

где $\phi = S/L$; S – смещение магнита; $L = 4$ см – полудлина КМ, $F = 44,2$ дин (см. табл. 2). Из формул (7)

и (8) получаем: $S = 32 FL^2 l / \pi G d^4 = 1,68$ см.

Полученное значение S можно было бы реализовать при отсутствии неподвижных пластин 5 дифференциального конденсатора (см. рис. 4), а на практике оно определяется зазором 2 мм между неподвижными пластинами 5 и равно $S = 1$ мм. Если ввести с коэффициентом $\beta = 25$, то S уменьшится

в 25 раз и его максимальное значение составит 40 мкм. Малое значение S благоприятно сказывается на метрологических характеристиках прибора (точности, линейности и др.), так как измеряемый образец находится в зоне практически постоянного градиента магнитного поля. Отметим и такой факт: хотя по принципу действия рассмотренный КМ является маятниковой системой, в действительности в приборе никаких колебаний не происходит благодаря действию двойного демпфирования – вихревых токов и ООС. В результате выходной электрический сигнал изменяется по законам постоянного электрического тока.

Анализ технических характеристик ИМВ

Цена деления прибора

Данный параметр определяется формулой (3). Цена деления любого прибора – величина, обратная его чувствительности. Экспериментально, соблюдая все метрологические правила, для опытного образца ИМВ определена величина $K = 4 \cdot 10^{-11}$ ед. СГСМ / мкВ. Если уровень шумов выходного напряжения U не превышает 10 мкВ, то порог чувствительности ИМВ составит $4 \cdot 10^{-10}$ ед. СГСМ. Заметим, что реальные значения k для диа- и парамагнитных веществ находятся в пределах 10^{-6} – 10^{-5} ед. СГСМ и, следовательно, чувствительность прибора в 10^4 раз выше, чем для самых слабомагнитных веществ.

В качестве примера высокой чувствительности ИМВ приведем данные измерений k для ряда мелких образцов веществ (табл. 4).

Таблица 4

Измерения k для мелких образцов

Предмет измерения	U , мВ	k , ед. СГСМ
Частица манной крупы	0,7	$2,8 \cdot 10^{-8}$
Маковое зерно	1,9	$7,6 \cdot 10^{-8}$
Песчинка (мелкий песок)	6,5	$2,6 \cdot 10^{-7}$
Пшеничное зерно	18	$7,2 \cdot 10^{-7}$
Рисовое зерно	50	$2 \cdot 10^{-6}$

Подобных данных ни в отечественной, ни в зарубежной литературе обнаружить не удалось.

Влияние внешних магнитных помех

Замечательным свойством МФ в отличие от всех других точных методов магнитометрии является то, что он обладает возможностью автоматической защиты от внешних магнитных помех. В приборе ИМВ эта возможность реализована весьма простым способом: подвижный магнит имеет только одну степень свободы перемещения в направлении оси чувствительности, совпадающей с осью намагниченности магнита. В этом случае однородное магнитное поле на прибор никакого влияния не оказывает.

Для выяснения степени влияния неоднородных магнитных помех проведен следующий эксперимент (рис. 5).

На расстоянии $R = 300$ см от центра прибора 2 устанавливался магнит 1 с моментом $M = 28000$ Э·см³ в трех положениях: вдоль осей x , y и z . Данные вычислений магнитных полей в точке A (H_x , H_y и H_z) и соответствующая реакция прибора приведены в табл. 5.

Из табл. 5 следует, что максимальное влияние на прибор оказывает x -компонента магнитного поля: коэффициент ее влияния $\gamma = k/H_x = 4,2 \cdot 10^{-10}$ ед. СГСМ / нТл.

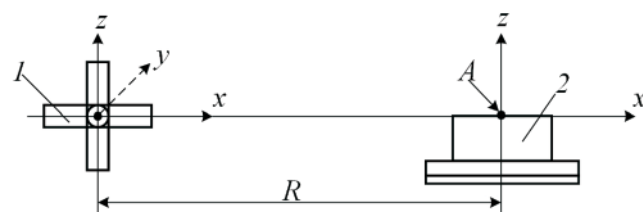


Рис. 5. Схема установки для определения влияния неоднородных магнитных полей на результаты измерения магнитной восприимчивости

Таблица 5

Магнитные поля и соответствующая реакция прибора: выходное напряжение U и магнитная восприимчивость k

Компонента	x	y	z
H , нТл	415	200	200
U , мВ	4,34	0	1,77
k , ед. СГСМ	$1,74 \cdot 10^{-7}$	0	$7,1 \cdot 10^{-8}$

Отметим, что в городских условиях магнитные помехи обусловлены в основном движением транспортных средств (автобусов, троллейбусов, тракторов и других объектов), магнитный момент которых по данным измерений не превышает 30000 Э·см³. Ориентировочный расчет величины влияния магнитных помех при движении одновременно десяти транспортных единиц на расстоянии $R = 20$ м дает следующий результат: $H = 10M/R^3 = 37,5$ нТл; $k = \gamma H = 1,5 \cdot 10^{-8}$ ед. СГСМ.

Измерения в черте Новосибирске (Академгородок) показали, что среднестатистический уровень городских магнитных помех на расстоянии 20 м от путей движения авто-мототранспорта составляет 25 нТл за 1 ч наблюдений; $k = 10^{-8}$ ед. СГСМ, т. е. близко к расчетному значению. Погрешность измерения k вследствие транспортной помехи очень мала и позволяет проводить точные измерения магнитной восприимчивости любых образцов в черте города. Это дает существенный экономический эффект, так как отпадает необходимость в дорогостоящих загородных лабораториях.

Требования к измеряемым образцам

Место установки образца – центр предметного столика с плоской и гладкой поверхностью; следовательно, и образец должен иметь плоскую и желательно гладкую поверхность. Для жидких и порошкообразных веществ это требование выполняется автоматически путем заполнения ве-

ществом контейнера в виде полого цилиндра с тонким пленочным дном. Для огранки твердых тел, главным образом горных пород, применяется камнерезная и камнешлифовальная техника. Так, для палеомагнитных исследований изготавливаются образцы в форме правильных кубиков, требующие шестигранной обработки. При использовании в данной области измерений ИМВ можно сократить число граней в образце до трех. При изготовлении образцов необходимо соблюдать правило АЗ образца.

О точности измерения магнитной восприимчивости

Бытовое понятие «точность» в метрологии заменяют противоположным – «погрешность измерения». Для прибора ИМВ значение погрешности неоднозначно и во многом зависит от плотности контакта измеряемого образца с предметным столиком прибора. Идеальным контактом обладают жидкие и порошкообразные вещества, например, вода.

Относительные среднеквадратические значения погрешности измерения κ для некоторых диа- и парамагнитных материалов составляют (%): дистиллированная вода – 0,075; оптическое стекло плоско-выпуклой линзы – 0,11; алюминиевая пластина с шероховатостью 5 мкм – 0,55; деревянный брусок, обработанный рубанком, – 1,1.

Погрешность зависит от выбранного материала и не связана с прибором. Поэтому на практике рекомендуется для каждой партии образцов, например, керн, извлекаемого из скважины, проводить выборочную оценку погрешности по известной методике.

Зависимость «нуля» прибора от времени и температуры

Временная зависимость «нуля» определялась в магнитной обсерватории «Ключи» (Новосибирск) в термостабильном павильоне, где прибор оставался включенным в течение 380 часов (с 27 марта по 12 апреля 1992 г.). Прибор показал абсолютную стабильность «нуля»: его показания в начале и в конце испытаний совпали с высокой точностью.

Температурные испытания проводились на открытом воздухе в течение суток. При разности дневной и ночной температуры 21 °С разность показаний прибора составила 40,6 мВ ($1,6 \cdot 10^{-6}$ ед. СГСМ), что определило его температурный коэффициент: $\mu_T = 7,6 \cdot 10^{-8}$ ед. СГСМ/°С – результат вполне удовлетворительный.

Амплитудная характеристика

Амплитудная характеристика определяет зависимость выходного сигнала прибора U от входного κ . В идеальном случае отношение U/κ должно быть постоянным во всем диапазоне измерений. На практике этот закон нарушается, так как Фарадеев-

ская сила зависит от неоднородного параметра

$H \frac{dH}{dR}$. Для определения U/κ можно заменить κ маг-

нитным моментом, создаваемым катушкой с постоянным током I , которая устанавливается вместо образца. Величину тока в катушке изменяют дискретно, так, чтобы выходной сигнал U изменялся от минимального значения, например ± 20 мВ, до максимального (± 3000 мВ). Вычисляют среднее значение U/I и среднеквадратическое отклонение (СКО) от среднего. В нашем случае в диапазоне $U = \pm 1000$ мВ СКО составило 0,2 %, а в диапазоне $U = \pm 3000$ мВ – 0,5 %.

Метрологическое обеспечение ИМВ

ИМВ предназначен для относительных измерений κ , а также других магнитных величин (M , J , ν). По существу, ИМВ является компаратором, который сравнивает измеряемую величину образца с величиной калибровочного образца. Переходя в уравнении (3) к конечным величинам, получаем

$$\kappa = \frac{U}{\kappa_0} = \frac{U_0}{\kappa_0} \cdot \frac{\kappa}{\kappa_0}.$$

Формально погрешность самого прибора не входит в результат измерений. Действительно, основная погрешность измерений зависит от погрешности измерения калибровочного образца. Материалом для калибровочных образцов служат однородные по составу и стабильные по κ вещества, например, дистиллированная вода, сплавы алюминия. Изготовление калибровочных образцов никаких трудностей не вызывает, поэтому процедура метрологического обеспечения очень проста. Калибровочные образцы должны проходить метрологическую аттестацию (поверку) в лабораториях Госстандарта.

Диапазон измерения κ

Верхний предел измерения κ определяется максимальной амплитудой выходного напряжения электронного преобразователя, которая равна ± 3000 мВ относительно нулевого значения выходного сигнала прибора. Эта величина, умноженная на цену деления, дает диапазон измерений $\kappa = \pm 1,2 \cdot 10^{-4}$ ед. СГСМ. Значение κ для горных пород может превышать указанное. Для измерения κ таких образцов можно воспользоваться плоской прокладкой (материал – стекло или оргстекло толщиной 5 мм, площадью 10×10 см²), на которую устанавливается образец. Она увеличивает цену деления прибора примерно в 30 раз. Следовательно, диапазон увеличивается до $\kappa = \pm 3,6 \cdot 10^{-4}$ ед. СГСМ.

Возможности многофункциональных измерений с помощью ИМВ

Экспериментально установлено, что с помощью ИМВ можно измерять не только магнитную восприимчивость, но и другие характеристики гор-

ных пород, т. е. этот прибор может быть универсальным измерителем. Так, без каких-то дополнительных приспособлений он может регистрировать процесс изменения магнитной вязкости горной породы.

Зависимость выходного сигнала во времени, соответствующая изменению магнитной восприимчивости, показана на рис. 6.

Измерение магнитного момента M и остаточной намагниченности J требует несложного приспособления (рис. 7).

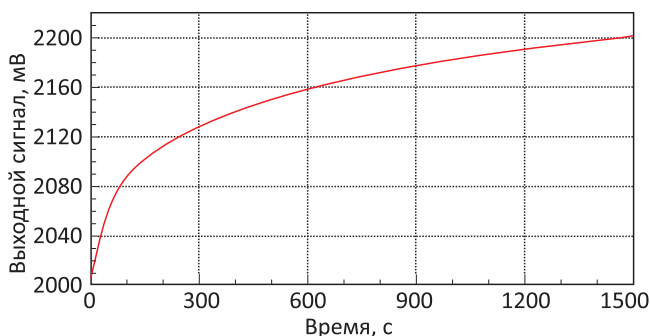


Рис. 6. График выходного сигнала при изменении магнитной восприимчивости образца горной породы во времени, зарегистрированный с помощью ИМВ

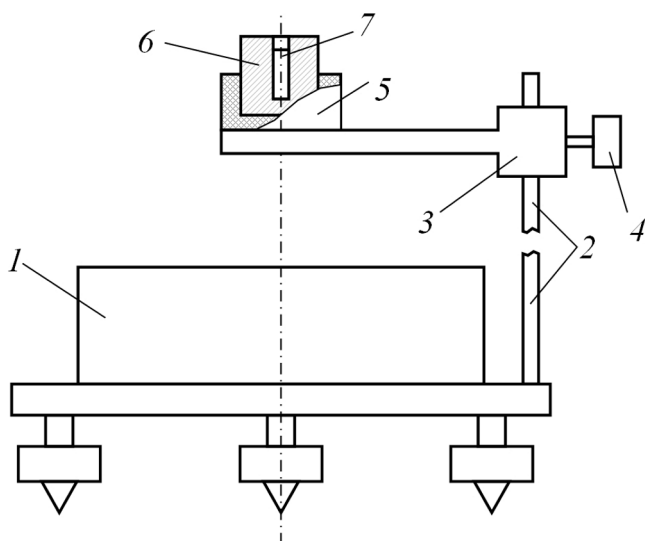


Рис. 7. Схема приспособления к ИМВ для измерения магнитного момента и остаточной намагниченности образцов горной породы

Корпус ИМВ 1 закреплен на основании, в которое ввинчивается круглый латунный стержень 2 длиной до 20 см; по стержню может перемещаться каретка 3 (оргстекло) со стопорным винтом 4. Каретка представляет одно целое с контейнером 5, куда помещается измеряемый образец. В этот же контейнер помещается вставка 6 с калибровочным образцом 7, например магнитом. Измерения проводят относительным способом:

$$M = \frac{U}{U_0} M_0, \quad J = \frac{U}{U_0} J_0,$$

где M и M_0 – магнитные моменты, J и J_0 – остаточная намагниченность измеряемого и калибровочного образцов.

Результаты мониторинга работы опытного образца ИМВ

Результаты долговременных испытаний опытного образца ИМВ намного превзошли ожидаемые. Обобщенный итог мониторинга показал, что прибор безотказно работает до настоящего времени, хотя ввод его в эксплуатацию произошел 36 лет назад. Таким образом, были установлены новые качества опытного образца ИМВ, которые до мониторинга были недостаточно изучены: долговечность и надежность конструкции, стабильность технических характеристик, возможность эксплуатации в любых климатических и географических условиях (имеются в виду полевые условия), простота конструкции и обслуживания, неприхотливость к условиям размещения, т. е. возможность обходиться без специальных помещений и фундаментов.

Во время мониторинга прибор находился в постоянной эксплуатации, включая периоды его передачи на правах аренды следующим организациям: ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, НПО «Геофизика», Санкт-Петербургский филиал ИЗМИР РАН, НПП ГА «Луч» (Новосибирск), Институт океанологии ДВО РАН (Владивосток).

И, наконец, следует сказать о важной для геофизических приборов проблеме – защите их от механических воздействий (ударов, сотрясений и т. д.), проявляющихся в основном при транспортировке. Неслучайно ИМВ уцелел во время многочисленных перевозок по стране различными видами транспорта. Меры защиты прибора от механических повреждений, которые заложены в его конструкции, оказались достаточно эффективными. Не станем их описывать, но отметим, что специальные требования к перевозке прибора не выдвигаются, они остаются такие же, как и для любых точных геофизических приборов.

Опытный образец ИМВ: дополнительные технические данные

Положительные результаты реконструкции МФ в полной мере отражены в опытном образце ИМВ, который прошел многолетние испытания: государственные, полевые, мониторинговые и др. Поэтому ИМВ наиболее точно соответствует требованиям современной геофизической магнитометрии в области изучения магнитных свойств горных пород. Он обладает рекордными показателями по чувствительности, технологичности, простоте конструкции и метрологического обслуживания. Внешний вид опытного образца ИМВ показан на рис. 8.

ИМВ состоит из полого цилиндрического корпуса, внутри которого находится электроме-



Рис. 8. Внешний вид опытного образца ИМВ

ханический преобразователь. Корпус изготовлен из алюминиевого сплава, имеет разъемно-герметичную конструкцию и возможность вакуумирования внутренней полости при эксплуатации во влажной среде. Верхняя плоская площадка корпуса служит предметным столиком для измеряемых образцов с центром, который обозначен концентрическими рисками. Общий вес измерительного блока 2 кг, диаметр 20 см, высота без установочных винтов 4,5 см. С внешними устройствами (малогабаритными источниками электропитания и мультиметром) прибор весит не более 3 кг, что обеспечивает его мобильность в любых полевых условиях. Внешнее оформление опытного образца ИМВ применительно к геофизическим условиям использования рекомендуется оставить без изменения, не внося дизайнерские излишества, которые имели место в заводском исполнении ИМВ [1].

Выводы

Модернизация геофизической магнитометрии, состоящей из разнородных по принципу действия приборов, как правило, не способных к самоусовершенствованию, безусловно, необходима как для единства метрологического обеспечения, так и для технологического упрощения. Эти проблемы наиболее эффективно можно решить путем реконструкции МФ, имеющего прямое отношение к измерениям магнитных свойств веществ в диапазоне от диа- и парамагнитных до слабомагнитных образцов. В числе наиболее важных результатов, достигнутых в ходе этой реконструкции, в первую очередь, простота конструкции измерительного

прибора, хорошо сочетающаяся с другими важными характеристиками:

- высокая чувствительность и точность;
- эффективная помехозащищенность (имеются в виду различные магнитные помехи);
- метрологичность (простое метрологическое обеспечение);
- многофункциональность (использование одного прибора для измерения магнитной восприимчивости, магнитного момента, остаточной намагниченности и магнитной вязкости образцов горных пород);
- мобильность и надежность (возможность применения в любых климатических и географических условиях).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копытенко Ю. А., Кротович Н. Ф., Никитенко М. Н. Размагничивание диа- и парамагнетиков, применяемых в приборах точной магнитометрии // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.): Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология»: сб. матер. в 3 т. Т. 2. – Новосибирск, 2015. – С. 161–166.
2. Кротович Н. Ф., Сергеев В. Г. Портативный высокочувствительный измеритель магнитной восприимчивости // Геофизическая аппаратура. – 1983. – Вып. 78. – С. 11–20.
3. Магниторазведка. Справочник геофизика / Под ред. В. Е. Никитского, Ю. С. Глебовского. – М.: Недра, 1980. – 367 с.
4. Яновский Б. М. Земной магнетизм. – М.: ГИТТЛ, 1953. – 591 с.
5. Schmidt H. Ein Torsions-Suszeptometer und Eisenfreiheits – Prüfgerät // Sonderheft zum 70-jährigen Bestehen des Geomagnetischen Instituts Potsdam. – Berlin, Akademie, Verlag. – 1961. – No. 27. – S. 139–142.

REFERENCES

1. Kopytenko Yu.A., Krotevich N.F., Nikitenko M.N. [Demagnetization of diamagnetic and paramagnetic materials used in precision magnetometry devices]. *Interexpo GEO-Sibir'-2015. XI Mezhdunar. nauch. kongr. (g. Novosibirsk, 13–25 aprelya 2015 g.): Mezhdunar. nauch. konf. "Nedropol'zovaniye. Gornoye delo. Napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh. Geoekologiya": Sb. materialov v 3 t.* [Interexpo GEO-Siberia-2015. XI Intern. scientific congr. (Novosibirsk, April 13–25, 2015): Intern. scientific conf. "Subsoil use. Mining. Directions and technologies of prospecting, exploration and development of mineral deposits. Geoecology": Col. materials in 3 vols]. Novosibirsk, 2015, vol. 2, pp. 161–166. (In Russ.).
2. Krotevich N.F., Sergeev V.G. [Portable highly sensitive magnetic susceptibility meter]. *Geofiziches-*



kaya apparatura. Sbornik statey [Geophysical equipment. Collected papers], 1983, issue 78, pp. 11–20. (In Russ.).

3. Nikitskii V.E., Glebovskii Iu.S., eds. *Magnitorazvedka. Spravochnik geofizika* [Magnetic exploration. Handbook of Geophysicists]. Moscow, Nedra Publ., 1980. 367 p. (In Russ.).

4. Ianovskii B.M. *Zemnoy magnetizm* [Terrestrial Magnetism]. Moscow, GITTL Publ., 1953. 591 p. (In Russ.).

5. Schmidt H. Ein Torsions-Suszeptometer und Eisenfreiheits – Prüfgerät. *Sonderheft zum 70-jährigen Bestehen des Geomagnetischen Instituts Potsdam*, Berlin, Akademie Verlag, 1961, no. 27, S. 139–142.

© М. Н. Никитенко, Н. Ф. Кротевич,
Ю. А. Копытенко, 2019